

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK ALIRAN DIDALAM *RECTANGULAR ELBOW 90°* YANG DILENGKAPI DENGAN SUDU PENGARAH

Nama Mahasiswa : DANIES SETYO HUSODO
NRP : 2109 100 089
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng.Ph.D

Abstrak

Saat ini, instalasi pipa yang mempunyai efisiensi tinggi sangat menunjang kemajuan proses produksi. Salah satu contoh sambungan perpipaan (fitting) adalah elbow 90°. Penggunaan elbow dalam perancangan sistem perpipaan, akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran. Hal tersebut dikarenakan oleh perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut. Nilai penurunan tekanan (pressure drop) pada aliran yang melalui elbow tersebut dipengaruhi oleh besarnya jari-jari kelengkungan dan sudut belok dari elbow, yang menyebabkan terjadinya separasi dan aliran sekunder (secondary flow) pada elbow.

Model uji yang akan digunakan di dalam studi ini berupa rectangular elbow 90° dengan radius ratio (r_m/D_h) 1.87 dengan penambahan sudu pengarah. Sudu pengarah yang digunakan ada 2 model yaitu model 1 dan 2. Variabel yang diukur adalah tekanan stagnasi dan tekanan statis. Tekanan stagnasi diukur dengan menggunakan pitot tube sedangkan tekanan statis diukur menggunakan inclined manometer yang dihubungkan dengan wall pressure tap. Penelitian dilakukan secara eksperimen dan numerik, dimana penelitian numerik menggunakan software Fluent 6.3.26 dan Gambit 2.4.6.

Hasil studi yang didapatkan dengan model 2 pada eksperimen meningkatkan pressure drop yaitu sebesar 67.41% dibanding dengan Model 1, sedangkan numerik menurunkan

pressure drop sebesar 50.71%. Elbow model 1 memiliki jumlah vortex sebanyak 2 buah, sedangkan model 2 memiliki jumlah vortex sebanyak 4 buah mengakibatkan blockage effect yang merupakan penyebab dari pressure drop. Hasil simulasi numerik tentang kontur tekanan dan kecepatan aliran sangat mendukung hasil eksperimen.

Kata kunci : headloss, model 1, model 2, sudu pengarah, pressure drop, rectangular elbow 90°, secondary flow.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF FLOW IN RECTANGULAR ELBOW 90° WITH GUIDE VANE

Student Name : DANIES SETYO HUSODO
NRP : 2109100089
Major : Mechanical of Engineering FTI-ITS
Lecture : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D

Abstract

In this time, the installation of pipes has high efficiency to support the progress of the production process. One example of piping connection (fitting) is a 90° elbow. The use of elbows in the piping system design, will lead to a loss of pressure in the flow. This is due to the change in direction of fluid through the channel. Value of the pressure drop (pressure drop) in the flow through the elbow is affected by the magnitude of the radius of curvature and turn angle of the elbow, which led to the separation and secondary flow (secondary flow) at the elbow.

The test model used in this study is rectangular 90° elbow with a radius ratio (r_m/D_h) 1,875. Model 2 with extended 70 mm. Model 1 without extended, and $Re_{Dh} \approx 2,1 \times 10^4$. The measured variable are stagnation pressure and static pressure. Stagnation pressure was measured using pitot tube, while static pressure was measured using the Inclined manometer connected to wall pressure tap. Research conducted experimentally and numerically using the software Fluent 6.3.26, and Gambit 2.30.

The results obtained in experiments with model 2 is 67.41%. It can increase pressure drop than model 1. For numeric is that model 2 numeric is 50.71%. It can reduce pressure drop than model 1. Model 1 have 2 vortices then model 2 have 4 vortex. The results numeric can inform pressure contour, and velocity.

Keywords : Guide vane, headloss, model 1, model 2, pressure drop, rectangular elbow 90°, secondary flow

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK ALIRAN
DIDALAM RECTANGULAR ELBOW 90° YANG
DILENGKAPI DENGAN SUDU PENGARAH**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DANIES SETYO HUSOSDO

NRP. 2109 100 089

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D(Pembimbing)
NIP. 196412281990031002
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Penguji I)
NIP.197104051997021001
3. Nur Ikhwan, ST. M.Eng(Penguji II)
NIP. 196709151995121001
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT(Penguji III)
NIP. 196202161995121001

**SURABAYA
JULI, 2014**

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 <i>Error</i> dalam memprediksi tekanan statis <i>rectangular bend</i> 90^0 pada masing-masing permodelan turbulensi..... | 18 |
| Tabel 3.1 Posisi pengukuran <i>pressure tap</i> pada <i>rectangular elbow</i> 90^0 model 1 | 31 |
| Tabel 3.2 Posisi pengukuran <i>pressure tap</i> pada <i>rectangular elbow</i> 90^0 model 2 | 31 |
| Tabel 3.3 Analisa <i>grid independency</i> | 48 |
| Tabel 4.1 Data eksperimen perbandingan <i>elbow</i> model 1 dan model 2..... | 76 |
| Tabel 4.2 Data numerik perbandingan <i>elbow</i> model 1 dan model 2..... | 76 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

| | |
|----------------|--|
| a | : tinggi <i>cross section elbow</i> 90°, (mm) |
| b | : lebar <i>cross section elbow</i> 90°, (mm) |
| D_h | : diameter hidrolik, $D_h = 4.A_c / P = 4.a.b / 2$ |
| $(a+b)$, (mm) | |
| L_i | : panjang <i>inlet elbow</i> , (mm) |
| L_o | : panjang <i>outlet elbow</i> , (mm) |
| n | : jumlah <i>guide vane</i> , tak berdimensi |
| R_i | : <i>inner radius elbow</i> , (mm) |
| R_o | : <i>outer radius elbow</i> , (mm) |
| R_m | : <i>mean radius elbow</i> , $R_m = (R_i + R_o)/2$, (mm) |
| R_m/D_h | : <i>radius ratio</i> , tak berdimensi |
| \square/h | : bilangan untuk menyatakan derajat sudut <i>elbow</i> dimulai pada $x_i/D_h = 1.649$ yaitu pada <i>inlet elbow</i> 90° dan x_i dimulai dari <i>inlet test section</i> |
| li | : panjang total dari <i>inner wall</i> , (mm) |
| l_o | : panjang total dari <i>outer wall</i> , (mm) |
| C_p | : <i>wall pressure coefficient</i> , $C_p = (p_{s,i} - p_{ref}) / (0,5 \cdot \rho \cdot U_{ref}^2)$, tak berdimensi |
| g | : percepatan gravitasi (kg/m ²) |
| $p_{s,i}$ | : tekanan statis dinding pada $x/D_h = i$, (Pa) |
| p_{ref} | : tekanan statis referensi pada $x/D_h = 0$, (Pa) |
| p_o | : tekanan stagnasi yang diukur dengan <i>stagnation pressure tube</i> , (Pa) |
| p_s | : tekanan statis sejajar dengan <i>stagnasi pressure tube</i> , (Pa) |
| r/b | : koordinat normal <i>streamline</i> , tak berdimensi |

| | |
|---------------------------------------|---|
| Re_{Dh} | : bilangan <i>Reynolds</i> = $\frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}$, tak berdimensi |
| SG | : <i>specific of gravity</i> , tak berdimensi |
| u | : kecepatan lokal rata – rata, (m/s) |
| U_{ref} | : kecepatan referensi yang diukur pada $x/L_i = 0$, atau $x/L_o = 0$, (m/s) |
| x_i/D_h | : koordinat sepanjang <i>streamline</i> berdasarkan panjang sisi <i>inner</i> , tak berdimensi |
| x_o/D_h | : koordinat sepanjang <i>streamline</i> berdasarkan panjang sisi <i>outer</i> , tak berdimensi |
| z | : koordinat vertikal |
| $\Delta C_{p \text{ outer - inner}}$ | : selisih C_p maksimum di sisi <i>outer</i> dan C_p minimum di sisi <i>inner</i> , tak berdimensi |
| $\Delta C_{p \text{ outlet- outlet}}$ | : selisih C_p maksimum di sisi <i>outlet</i> dan C_p minimum <i>inlet</i> , tak berdimensi |
| $\frac{\partial p}{\partial x}$ | : gradien tekanan, (N/m ³) |
| $\frac{\partial p}{\partial r}$ | : gradien tekanan searah radial/ searah jari-jari, (N/m ³) |
| Δh | : selisih bacaan awal dan akhir manometer, (mm) |
| ν | : viskositas kinematis udara, (m ² /s) |
| ρ_{H_2O} | : massa jenis air, (kg/m ³) |
| ρ_{ud} | : massa jenis udara, (kg/m ³) |
| ϕ | : sudut <i>inclined manometer</i> , derajat |
| $(r-r')/b$ | : koordinat radius kelengkungan <i>elbow</i> tegak lurus searah <i>streamline</i> berdasarkan jarak anatara sisi <i>inner</i> dan <i>outer</i> tak berdimensi |

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan teori-teori dan referensi penelitian terdahulu yang mendukung dan berkaitan dengan studi yang akan dilakukan. Teori ini digunakan sebagai acuan dalam melaksanakan eksperimen dan menganalisa data-data hasil percobaan.

2.1 Persamaan Euler Pada Koordinat Streamline

Pada aliran fluida di sepanjang *streamline* pada kondisi *steady flow*, maka setiap partikel fluida berurutan yang melewati titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. Persamaan gerakannya dinyatakan dalam koordinat *streamline* yang dibangun dari persamaan *Euler* untuk aliran *inviscid* (pers. 2.1).

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.1)$$

Gambar 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* (Fox dan Mc Donald, 1998).

Gambar 2.1 menunjukkan ilustrasi gerakan partikel fluida di dalam medan aliran, dimana persamaan gerak di sepanjang *streamline* dinyatakan sebagai:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.2)$$

Dengan mengabaikan efek ketinggian, *steady flow* dan gaya body maka persamaan (2.2) menjadi

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 menunjukkan hubungan antara tekanan dengan kecepatan. Hal ini memenuhi hukum kekal energi, dimana jika aliran diasumsikan tanpa gesekan maka penjumlahan komponen tekanan dan kecepatan pada setiap titik adalah sama. Sedangkan persamaan gerak untuk aliran *steady* pada arah normal terhadap *streamline* dinyatakan sebagai:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.4)$$

Untuk aliran pada bidang horizontal maka persamaannya menjadi

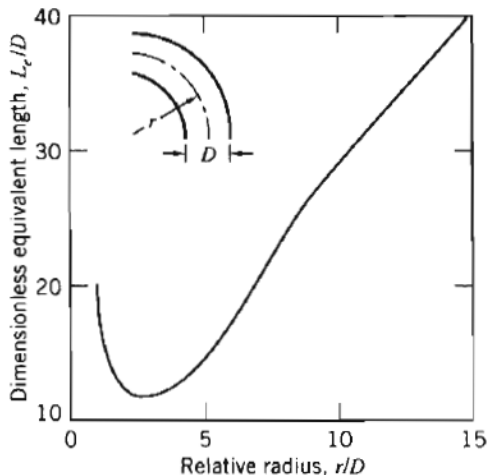
$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.5)$$

Persamaan 2.5 menyatakan perubahan tekanan di sepanjang normal *streamline* akan terjadi jika terdapat perubahan jari-jari kelengkungan. Semakin besar jari-jari kelengkungan maka tekanan yang terjadi juga semakin besar. Perbedaan tekanan ini digunakan untuk mengimbangi gaya sentrifugal. Namun jika streamlinenya lurus ($R = \infty$) maka tidak ada perubahan tekanan pada normal *streamline*. Oleh karena itu aliran di dalam pipa lurus, tekanan pada arah normalnya konstan.

2.2 Geometri Flow

Geometri *elbow* dinyatakan sebagai nilai *aspect ratio* r/D yaitu perbandingan antara *mean radius* dan lebar sisi *inlet*. Hubungan *aspect ratio* dan *total loss coefficient* yang menyatakan bahwa *total loss coefficient* merupakan penjumlahan dari *resistance due to length* dan *bend resistance*. *Resistance due to length* yaitu koefisien yang menunjukkan kerugian akibat gesekan, sedangkan *bend resistance* merupakan koefisien yang menunjukkan kerugian akibat adanya separasi. Semakin besar r/D

maka jarak tempuh lintasan fluida semakin panjang, dengan kata lain kerugian akibat gesekan yang terjadi akan semakin besar, hal tersebut ditunjukkan oleh kenaikan grafik *resistance due to length*.



Gambar 2.2 Grafik *total resistance* (L_e/D) untuk 90° pipe bends dan flanged elbow (Fox dan Mc Donald, 1998).

Gambar 2.2 menunjukkan nilai r/D yang kecil didapatkan nilai *bend resistance* yang besar, kemudian seiring dengan membesarnya nilai r/D , *bend resistance* mengalami penurunan sampai mencapai minimum kemudian naik kembali. Peningkatan nilai *bend resistance* hal tersebut dikarenakan *friction* antara fluida dengan *solid surface* yang semakin besar, sehingga aliran akan mudah terseparasi yang mengakibatkan *separation loss* semakin besar.

2.3 Koefisien Tekanan

Dalam menyatakan besarnya *pressure drop* yang terjadi pada suatu aliran secara tidak langsung dapat digunakan parameter yang disebut dengan koefisien tekanan (C_p). C_p pada

elbow diartikan sebagai perbedaan tekanan statis lokal pada dinding dengan tekanan statis acuan dibagi dengan tekanan dinamis yang diukur di bagian *inlet* yang dirumuskan pada persamaan 2.4. Selisih C_p antara *inlet* dengan *outlet* pipa menunjukkan besarnya *pressure drop* yang terjadi di sepanjang pipa, sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar ΔC_p maka semakin besar *pressure drop*.

$$C_p = \frac{p_s - p_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} \quad (2.4)$$

dimana:

| | |
|-----------------------------|---|
| p_s | = tekanan statis lokal pada dinding |
| p_{ref} | = tekanan statis acuan (referensi) |
| $\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2$ | = tekanan dinamis di <i>inlet elbow</i> |
| ρ | = massa jenis fluida pada kondisi kerja |
| U_{ref} | = kecepatan <i>freestream</i> yang diukur pada <i>inlet</i> . |

Kim dan Patel (1994) melakukan penelitian untuk mendapatkan distribusi tekanan di sepanjang *inner wall* dan *outer wall elbow* 90°. Hasil yang ditunjukkan menjelaskan bahwa saat aliran melewati *elbow* tekanan di sisi *inner wall* dan *outer wall* berbeda. Bagian *outer wall* koefisien tekanan bernilai positif, sedangkan pada *inner wall* memiliki koefisien tekanan bernilai negatif. Dapat disimpulkan bahwa tekanan *outer wall* lebih besar dari tekanan *inner wall*.

2.4 Aliran di dalam Elbow 90°

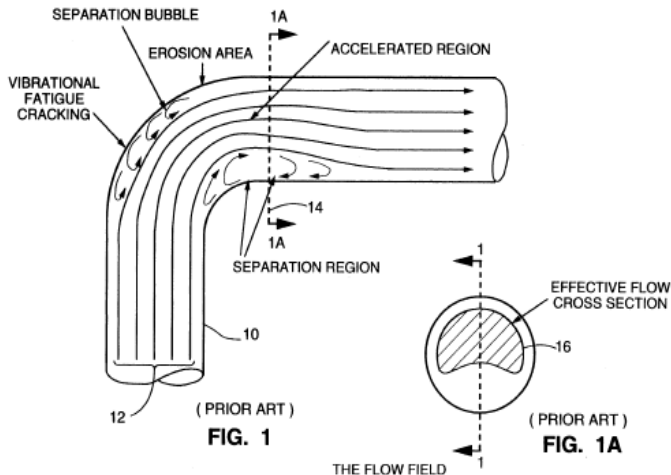
Aliran di dalam *elbow* mengalami *pressure drop* lebih besar jika dibandingkan dengan di dalam pipa lurus dengan panjang yang sama. Hal tersebut dapat diakibatkan oleh kerugian yang disebabkan oleh separasi dan *secondary flow* di dalam *elbow*.

2.4.1 Separasi di Dalam Elbow

Proses terjadinya separasi berawal dari aliran yang melintasi *elbow* 90° melawan gaya gesek akibat *surface*

roughness dinding dan hambatan berupa *adverse pressure gradient (APG)*. Kenaikan tekanan pada sisi *outer wall elbow* diakibatkan oleh jari-jari kelengkungan *elbow*. Gesekan antara dinding *elbow* dan partikel fluida dapat mengurangi momentum aliran, sehingga ketika melewati *adverse pressure gradient (APG)* aliran akan terseparasi (*separation loss*). Karena aliran ini memiliki momentum rendah, maka aliran akan terjebak dan membentuk *vortex*. *Vortex* ini dapat mengurangi energi aliran sehingga memberikan pengaruh terhadap munculnya *pressure drop*. *Vortex region* menyebabkan *effectiveness flow area* pipa yang dilewati aliran utama akan berkurang sehingga aliran akan mengalami percepatan. Sehingga tekanan aliran menurun secara signifikan.

Penelitian tentang aliran separasi di dalam *elbow* pernah dilakukan oleh Cheng (1994) dengan memasukkan cairan berwarna pada pipa transparan untuk mendapatkan gambaran *streamline* di dalam *elbow*.



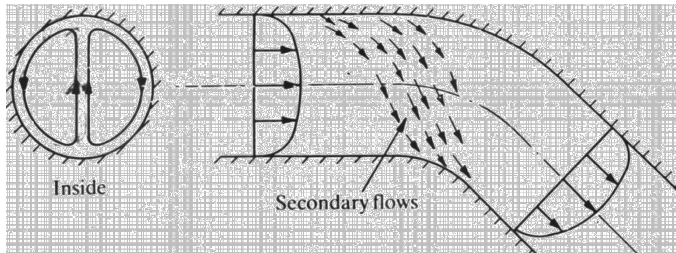
Gambar 2.3 Separasi pada *curved pipe* (Cheng, 1994).

Gambar 2.3 menunjukkan visualisasi menggunakan movie picture terlihat bahwa terjadi separasi aliran di sisi *inner* dan *outer wall elbow* yang menyebabkan aliran terseparasi. Pada sisi *inner*, terjadi kenaikan tekanan (*APG*) di dekat *downstream elbow*. Kenaikan tekanan ini membuat aliran terseparasi. Separasi aliran terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall* membuat *streamtube* aliran mengecil akibatnya terjadi percepatan aliran dan timbul *pressure drop* aliran.

2.4.2 Secondary Flow di dalam Elbow

Terbentuknya aliran sekunder pada *elbow* diakibatkan adanya perbedaan distribusi energy pada sisi *inner* dan *outer wall*. Perbedaan ini terjadi karena terdapat perbedaan tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall*. Semakin ke sisi luar maka tekanan statisnya semakin besar. Sehingga tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar dari sisi *inner wall*. Akibatnya aliran tidak hanya bergerak searah aliran utama saja karena ada kecepatan, akan tetapi bergerak secara tangensial menuju *inner*. Pada belokan, *secondary flow* di dalam *elbow* terlihat jelas pada sisi cross-sectionnya.

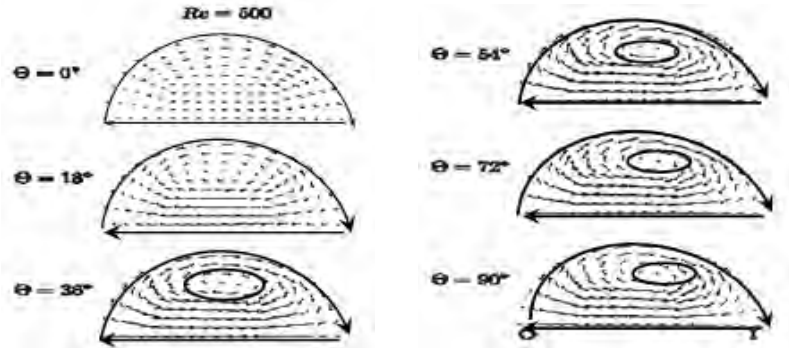
Gambar 2.4 menunjukkan penelitian tentang aliran melintasi *elbow* yang telah diteliti oleh Miller (1990) yaitu jika aliran melintasi saluran melengkung pasti aliran mengalami gaya sentrifugal di sisi *inner wall* dan *outer wall*. Sedangkan pada *rectangular elbow*, *secondary flow* tidak hanya dikarenakan oleh belokan pipa akibatnya energi *outer* lebih besar dari *inner*. Selain itu, diakibatkan juga adanya *vortex* pada sisi corner yang baik pada *inner* maupun *outer* yang bergerak secara rotasi dan translasi.



Gambar 2.4 *Secondary flow* di dalam *elbow* sirkular (Miller, 1990).

Vortex yang terjadi di sisi corner pada *rectangular elbow* diakibatkan adanya interaksi *boundarylayer* yang berkembang pada dinding bagian bawah dan samping. Timbulnya *secondary flow* dapat menyebabkan suatu aliran mengalami penyumbatan aliran (*blockage effect*). Hal inilah yang membedakan terbentuknya *secondary flow* pada *rectangular* dan *circular elbow*.

Marn dan Primoz (2006) melakukan studi numerik untuk mengamati karakteristik aliran melewati *circular elbow* 90^0 yang ditunjukkan oleh gambar 2.5. Salah satu karakteristik aliran yang diamati adalah *secondary flow* pada *elbow*, mulai dari *upstream* dan *downstream elbow*. Disini *upstream elbow* berada pada posisi 0^0 sedangkan *downstream* berada pada 90^0 .



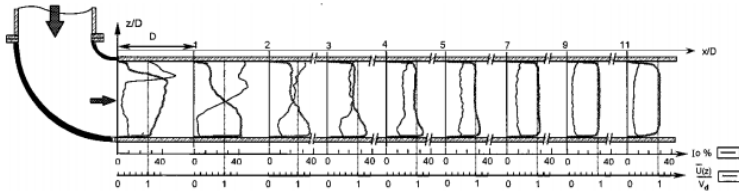
Gambar 2.5 *Secondary flow* pada masing-masing *cross section elbow* 90° (Marn dan Primoz, 2006).

Posisi 0° *vortex* belum terlihat dengan jelas, mulai 18° mulai terlihat terbentuknya *vortex* pada 36° pusat *vortex* mulai bergerak menuju *inner wall*, sedangkan pada 72° , *vortex* bergerak semakin mendekati *inner wall*. Posisi 90° *vortex* mengalami deformasi. Ini berarti terjadi *secondary flow* pada *elbow*, yaitu bergerak dari *outer wall* menuju *inner wall*.

2.5 Profil Kecepatan Pada *Downstream Elbow* Tanpa Sudu

Profil kecepatan pada *downstream elbow* tanpa sudu ditunjukkan oleh Danbon dan Sollic (2000) pada gambar 2.6. Spesifikasi *elbow* yang digunakan berdiameter 0,3 m dengan radius kelengkungan 0,2 m. Fluida yang digunakan adalah udara dengan kecepatan 40 m/s pada gambar 2.6 terlihat bahwa profil

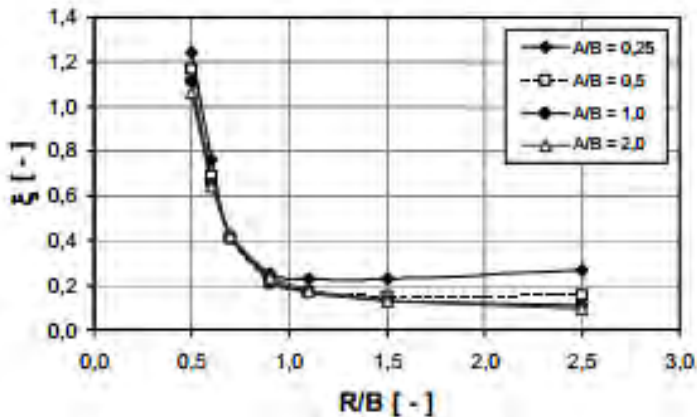
kecepatan sudah mencapai stabil / kembali normal pada jarak $8D$, kurang lebih 2,4 m dari *outlet elbow*.



Gambar 2.6. Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada *downstream elbow* (Danbon dan Sollicec, 2000).

2.6 Simulasi Numerik Pada Rectangular Elbow 90° Tanpa Sudu Pengarah

Simulasi numerik *rectangular elbow* 90° tanpa sudu pengarah ditunjukkan oleh Schwarzer dan Zmrhal (2009). Pada simulasi tersebut digunakan untuk mengetahui *local loss coefficient* pada *duct fittings* dengan metode numerik sebagai pembandingan dengan metode eksperimen.

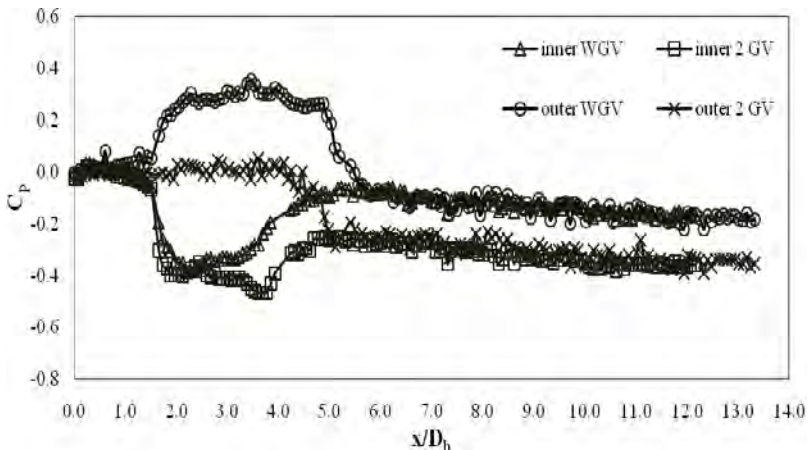


Gambar 2.7 Hasil simulasi *rectangular elbow* 90° (Schwarzer dan Zmrhal, 2009).

Gambar 2.7 menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio R/B maka koefisien tekanan lokal. Koefisien tekan lokal tinggi diakibatkan oleh gesekan. Gesekan semakin tinggi menyebabkan kehilangan koefisien tekan semakin besar.

2.7 Pengaruh Penambahan Sudu Pengarah di Dalam Rectangular Elbow 90°

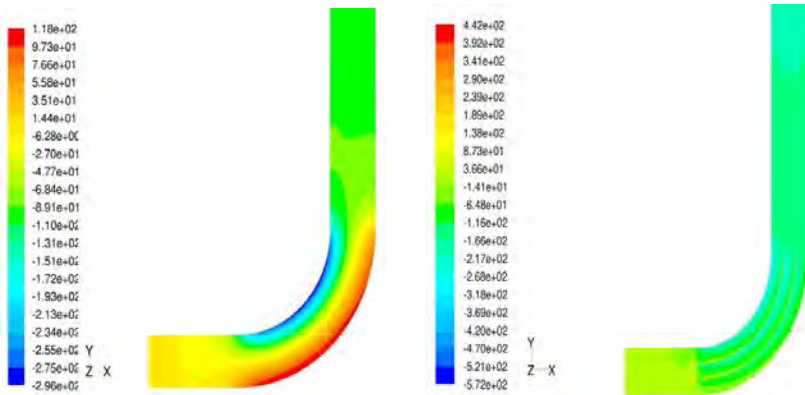
Puti (2010) melakukan studi eksperimen dan numerik tentang penambahan dua *guide vane* (sudu pengarah) terhadap *pressure drop* serta profil kecepatan aliran pada *rectangular elbow 90°*. Dalam penelitiannya digunakan 2 benda uji yaitu *rectangular elbow 90°* tanpa *sudu* dan dua *sudu pengarah*. Dengan bilangan *Reynolds* = 140000 serta kecepatan aliran 33 m/s. *Bend* yang digunakan mempunyai *radius ratio* (R_m/D_h) = 1.875.



Gambar 2.8 Distribusi C_p inner dan outer wall rectangular elbow 90° tanpa dan dua sudu pengarah $Re_{Dh} \approx 1,4 \times 10^5$ (eksperimen).(Puti, 2010)

Hasil penelitian secara eksperimen dapat dilihat pada gambar 2.8. Parameter yang secara tidak langsung menunjukkan besar kecilnya perubahan *pressure drop* ditentukan oleh selisih koefisien tekan (C_p). Distribusi nilai C_p di sepanjang *inner wall* dan *outer wall* menunjukkan bentuk grafik setangkup. Gambar 2.8

terlihat bahwa pada sisi *inner wall* mempunyai koefisien tekan (C_p) negatif dan pada sisi *outer all* mempunyai koefisien tekan (C_p) positif dengan kata lain pada daerah *midspan elbow* terdapat perbedaan nilai C_p yang cukup besar untuk *elbow* tanpa *guide vane*. Dua sudu pengarah perbedaan nilai C_p tidak terlalu besar pada daerah *midspan elbow*. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan sudu pengarah dapat mempengaruhi karakteristik aliran di sepanjang *test section*.



(a)

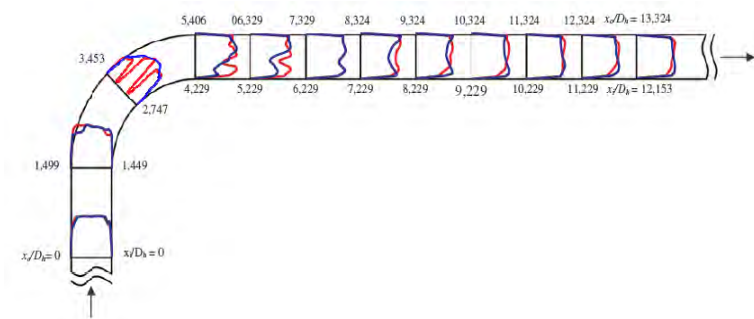
(b)

Gambar 2.9 Studi numerik kontur tekanan statis (N/m^2) pada *midspan elbow* (a) tanpa sudu pengarah; (b) dua sudu pengarah (Iswati, 2009).

Untuk *elbow* tanpa sudu pengarah kontur tekanan statis ditunjukkan pada gambar 2.9 (a). Terlihat bahwa aliran masih mempunyai tekanan statis pada daerah *upstream*. Kemudian akan mulai terpengaruh oleh kelengkungan geometri *elbow* yang berbelok 90° , akibatnya distribusi tekanan statis pada sisi *inner* dan *outer* tidak sama. Tekanan minimum terjadi pada sisi *inner* sedangkan tekanan maksimum terjadi pada sisi *outer*. Gambar 2.9 (b) juga terlihat bahwa dua *guide vanes* membagi satu *elbow*

menjadi tiga bagian yang sama besar dan masing-masing mempunyai sisi *inner* dan *outer*. Sisi *inner* tetap mempunyai tekanan yang rendah sedangkan sisi *outer* mempunyai tekanan yang tinggi. Namun dengan dua sudu pengarah, antara sisi *inner* dan *outer elbow* perbedaan koefisien tekan (C_p) menjadi kecil. Pada gambar ditunjukkan sisi *inner* bertekanan rendah dengan warna biru muda dan sisi *outer* bertekanan tinggi dengan warna hijau. Pada gambar ditunjukkan sisi *inner* bertekanan rendah dengan warna biru muda dan sisi *outer* bertekanan tinggi dengan warna hijau. Selain itu penambahan sudu pengarah dapat mempercepat aliran menuju keadaan *uniform*.

Selain itu terlihat bahwa dengan dua sudu pengarah dan peningkatan bilangan *Reynolds* akan semakin memperkecil perbedaan tekanan *inlet* dan *outlet elbow* yang bisa dilihat dari perbedaan harga koefisien tekan (C_p). Ini disebabkan dengan kecepatan yang lebih besar maka momentum yang dimiliki suatu aliran juga akan besar. Sehingga aliran mempunyai energi yang cukup untuk melawan kenaikan tekanan (ΔP_G).



Gambar 2.10 Distribusi profil kecepatan *section rectangular elbow 90°* tanpa dan dua sudu pengarah pada semua *section* secara eksperimen (Puti, 2010).

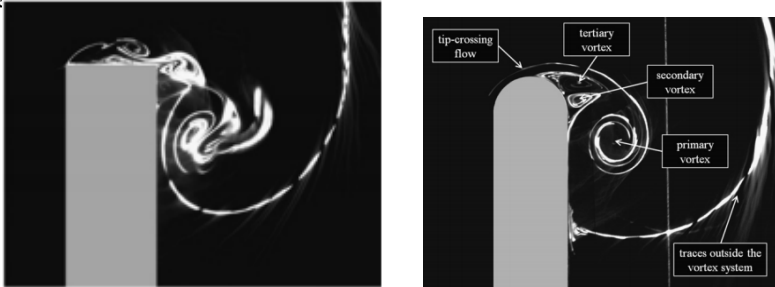
Gambar 2.10 menjelaskan tentang perkembangan profil kecepatan secara keseluruhan pada masing-masing *section elbow*. Sisi *inlet elbow* aliran masih uniform karena belum terpengaruh oleh bentuk geometri *elbow*. Selanjutnya pada section 2 dan 3 kecepatan maksimum aliran berada pada sisi *inner wall* sedangkan pada section 4 kecepatan maksimum berada pada sisi *outer wall* akibat pengaruh dari geometri *elbow* dan *friction factor* antara sudu pengarah dan *solid surface*. *Elbow* dengan dua sudu pengarah profil kecepatan aliran dibagi menjadi 3 dan antara kecepatan pada ketiga ruang hampir sama. Section 5 profil aliran sudah mulai menuju *recovery* namun kecepatan maksimum masih berada pada *outer wall*. *Elbow* dengan dua sudu pengarah kecepatan maksimum mulai terbentuk pada daerah tengah *radial elbow*. Section 6 *recovery* aliran terus berlanjut, untuk *elbow* tanpa sudu pengarah kecepatan maksimum masih terjadi pada *outer wall* namun pada *inner wall* sudah menunjukkan percepatan menuju *recovery*. Sedangkan pada *elbow* dengan dua sudu pengarah aliran jauh lebih *uniform* dibanding dengan tanpa *guide vane*.

Dengan dua *guide vane* profil kecepatan pada sisi *outlet elbow* belum sepenuhnya bisa menjadi *uniform* maka diperlukan jarak tertentu agar profil aliran menjadi *uniform* kembali. Penambahan sudu pengarah membuat profil kecepatan saat melintasi *elbow* sesaat uniform, namun setelah menuju *outlet elbow* keberadaan sudu pengarah juga memberi efek terhadap karakteristik aliran.

2.8 Pengaruh Bentuk *Rounded* dan *Square* pada Ujung *Guide Vane* (Sudu Pengarah) di Dalam *Rectangular Elbow 90°*

Gambar 2.11, Giuni dan Green (2013) melaksanakan penelitian tentang bentuk *vortex* di *square* sudu pengarah dan *rounded* sudu pengarah. Sudu pengarah (*Guide Vane*) yang diamati yaitu *square* dan *rounded* dengan spesifikasi NACA0012 profil, 0.76 m chord and 0.75 *aspect ratio* dengan kemiringan

profile $\alpha = 12^\circ$ dimana luas area *round tip* lebih besar 7% dari *square tip*. Metode yang digunakan ada 2 yaitu metode dengan visualisasi asap dan metode *Stereoscopic PIV* dengan bilangan *Reynolds number* = 3000

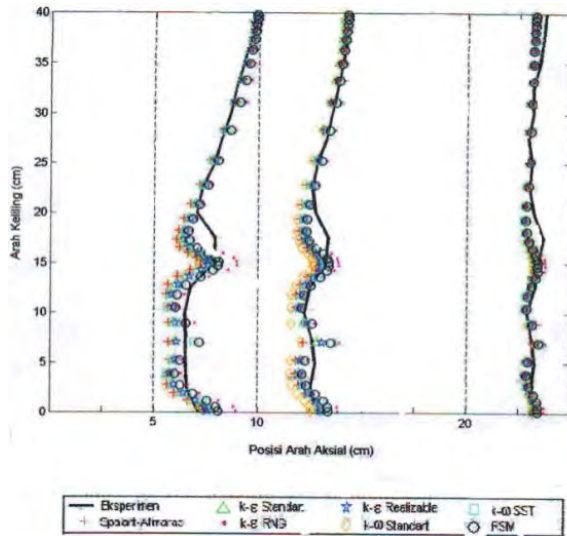


(a) *Square tip guide vane* (b) *Rounded tip guide vane*

Gambar 2.11 Bentuk *vortex* pada bilangan *Reynolds* = 3000 dengan metode visualisasi asap (Giuni dan Green, 2013).

2.9 *Fluent* Tutorial

Selanjutnya pada *fluent* tutorial dari Nur Ikhwan (2009) diambil contoh tentang kasus simulasi aliran pada *rectangular bend 90°*. Perbandingan model turbulensi dijelaskan pada *Fluent* tutorial dengan mengkomparasi aliran melewati *rectangular elbow* dengan menggunakan model turbulensi *Spallart - Allamaras*, $k-\omega$, $k-\epsilon$, dan *Reynolds Stress Model (RSM)*. Berikut ini akan disajikan grafik *static pressure* dengan menggunakan berbagai model.



Gambar 2.12 Prediksi tekanan statis dinding *outlet rectangular bend 90°* menggunakan berbagai macam permodelan (Nur Ikhwan, 2009).

Gambar 2.12 menunjukkan hasil prediksi ketujuh model turbulensi dimana prediksi tekanan statis dinding dari tujuh permodelan turbulensi yang memberikan hasil paling akurat adalah permodelan $k-\varepsilon$, RNG dan permodelan RSM . Untuk memperjelas grafik diatas, maka diberikan tabel penyimpangan dari masing – masing model yang digunakan dalam simulasi numeric pada $x = 5$ (mengacu pada tabel 2.1).

Tabel 2.1 *Error* dalam memprediksi tekanan *statis rectangular bend 90°* pada masing - masing permodelan turbulensi (Nur Ikhwani, 2009)

| No | Hasil Eksperimen / Simulasi | %Error |
|----|-----------------------------|--------|
| 1 | Eksperimen (Eddy, 2000) | - |
| 2 | Spalart-Allamaras | 7,53 |
| 3 | k- ϵ Standart | 4,52 |
| 4 | k- ϵ RNG | 4,66 |
| 5 | k- ϵ Realizable | 4,39 |
| 6 | k- ω Standart | 5,76 |
| 7 | k- ω SST | 4,99 |
| 8 | RSM | 4,44 |

dari ketujuh permodelan, permodelan turbulensi yang baik dalam memprediksi tekanan statis dinding adalah permodelan *k- ϵ Realizable*. Hal ini dikarenakan *error* yang terjadi pada model tersebut paling kecil, sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan permodelan lain untuk mendeskripsikan tekanan statis.

2.10 Deskripsi Tentang RANS *Turbulence Model*

- ***Realizable k- ϵ*** : Variasi pemodelan dari standard *k- ϵ* model. Permodelan turbulensi yang baik dalam memprediksi tekanan statis dinding. Hal ini karena *error* yang terjadi pada model tersebut paling kecil. Jenis permodelan ini paling cocok untuk memprediksi laju penyebaran pancaran *nozzel/jet*. Model ini juga memberikan performa yang bagus untuk aliran yang

melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai *gradien* tekanan yang besar, separasi dan resirkulasi

- **RNG (Renormalization-group) k - ϵ :** Variasi pemodelan dari *standard k - ϵ* model. Model ini sangat signifikan untuk mengubah dalam persamaan ϵ sehingga dapat memperbaiki untuk model yang mempunyai *highly strained flows*. Dalam model ini juga dapat digunakan untuk aliran yang mempunyai bilangan *Reynolds* yang rendah dan untuk memprediksi aliran yang mempunyai efek *swirling*.
- **RSM (Reynolds stress model):** Merupakan model turbulensi yang paling teliti pada fluent. Model RSM mendekati persamaan Navier-Stokes (*Reynolds-averaged*) dengan menyelesaikan persamaan transport. Model ini menggunakan 5 persamaan transport, lebih banyak dibanding model turbulensi yang lain.
- **Spalart–Allmaras:** Merupakan model turbulensi dengan satu persamaan yang menyelesaikan model persamaan *transport* untuk viskositas turbulen. Model ini didesain secara khusus untuk aplikasi *aerospace* yang melibatkan *wall-bounded flows* dan telah menunjukkan hasil yang baik untuk lapisan batas yang dipengaruhi *adverse pressure gradient*. Bentuk dasar model spalart – allmaras hanya efektif pada model dengan bilangan *Reynolds* yang kecil. Model ini dapat digunakan untuk simulasi yang relatif kasar dengan ukuran *mesh* yang besar, dimana perhitungan aliran turbulen yang akurat bukan merupakan hal yang kritis.
- **Standard k - ϵ :** Pemodelan yang menggunakan persamaan transport untuk *turbulent kinetic energy* (k) dan *dissipation rate* (ϵ). Model ini juga dapat menyelesaikan untuk *heating*, *buoyancy*, and *compressibility* yang dapat diselesaikan dalam k - ϵ model yang lainnya. Model tidak cocok untuk aliran kompleks yang meliputi *stong stream curvature* dan *separation*.
- **Standard k - ω :** Pemodelan yang menggunakan dua persamaan transport model untuk *turbulent kinetic energy* (k) dan

specific dissipation rate (ω). Pemodelan ini juga dapat digunakan untuk aliran yang memiliki bilangan *Reynolds* yang rendah. Pemodelan ini juga dapat menampilkan transisi aliran dari aliran laminar menuju aliran turbulen. Keuntungan lainnya adalah dapat menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.

- **SST (Shear-stress transport) $k-\omega$:** Variasi dari pemodelan standard $k-\omega$. Menggabungkan pemodelan asli untuk menggunakan *near wall treatment* dan standard $k-\epsilon$ model.

2.11 Parameter Pada Kondisi Batas

- **Cell Zone, Fluid:** Kondisi ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai fluida dan sebagai media berpori. Data yang harus dimasukkan hanya material fluida. Kondisi batas ini digunakan untuk kasus aliran periodik secara rotasional.
- **Cell Zone, Solid:** Kondisi ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai padatan dan *heat generation rate* pada kontinum solid. Data yang harus dimasukkan hanya material padatan. Kondisi batas ini digunakan untuk kasus aliran periodik secara rotasional.
- **Dinding (Wall):** Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan.
- **Mass Flow Inlet:** Kondisi batas ini harus dimasukkan data laju aliran massa atau fluks massa, temperatur fluida (apabila mengaktifkan persamaan energi), tekanan gauge pada sisi masuk, arah aliran dan besaran turbulensi. Nilai tekanan gauge tersebut sebenarnya hanya akan digunakan sebagai tebakan awal oleh *Fluent* dan akan dikoreksi sendiri sejalan dengan proses iterasi.
- **Inlet Vent dan Outlet Vent:** Kondisi batas ini digunakan untuk model saluran masuk/keluar aliran dimana terdapat

peralatan ventilasi di sisi saluran masuk/keluar yang dapat menimbulkan kerugian tekanan pada aliran. Data yang dimasukkan sama seperti pada kondisi batas *pressure outlet/pressure inlet*.

- **Intake Fan dan Exhaust Fan:** Kondisi batas ini digunakan untuk model saluran masuk/keluar aliran dimana terdapat fan *blower* disisi luar saluran masuk/keluar untuk menghembuskan/menghisap fluida di dalam saluran. Data yang dimasukkan sama seperti pada kondisi batas *pressure outlet/pressure inlet*.
- **Kondisi Batas Internal:** Kondisi batas internal antara lain adalah fan, radiator, porous jump, interior. Kondisi batas ini digunakan untuk bidang yang berada di tengah medan aliran dan tidak mempunyai ketebalan.
- **Outflow :** Kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar. Tidak perlu memasukkan data apapun pada kondisi batas ini, namun kondisi harus *inkompresible flow* (Firman Tuakia, "Dasar-Dasar CFD", 2008).
- **Periodic:** Kondisi batas periodik juga digunakan untuk mengurangi daya komputasi pada kasus tertentu. Kondisi batas ini hanya dapat digunakan pada kasus yang mempunyai medan aliran dan geometri yang periodik, baik secara translasi atau rotasi.
- **Pressure Inlet:** Kondisi batas ini harus dimasukkan data tekanan total (absolut), tekanan gauge, temperatur, arah aliran dan besaran turbulen. Tekanan total yang dimaksud di sini merupakan penjumlahan dari nilai tekanan operasi dan tekanan gauge.
- **Pressure Outlet:** Kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati sebenarnya. Kondisi batas *pressure outlet* harus memasukkan nilai

tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*) dan besaran turbulen aliran balik.

- ***Pressure Far Inlet:*** Kondisi batas digunakan untuk memodelkan aliran *kompresibel free stream* yang mempunyai dimensi yang sangat panjang (jarak antara *inlet* dan *outlet* jauh sekali). Kondisi batas ini berada pada sisi keluar aliran. Besaran yang harus dimasukkan adalah tekanan gauge, bilangan *Mach*, temperatur aliran (jika melibatkan temperatur/energi), arah aliran dan besaran turbulensi pada sisi keluar.
- ***Porous Media:*** *Porous zone* merupakan pemodelan khusus dari zona fluida selain padatan dan fluida. Digunakan untuk memodelkan aliran yang melewati media berpori dan tahanan terdistribusi.
- ***Symmetry dan Axis:*** Kondisi batas ini digunakan untuk mengurangi daya komputasi yang dibutuhkan pada suatu kasus. Pada panel kondisi batas untuk kedua kondisi batas ini tidak ada input data yang diperlukan.
- ***Velocity Inlet:*** Kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran *inkompresible*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

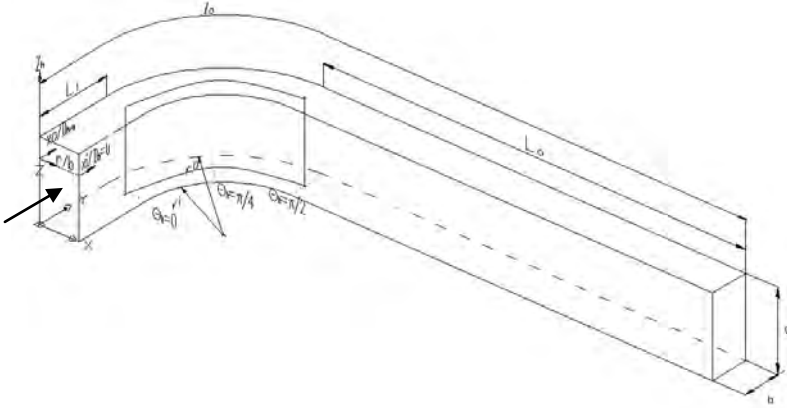
METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai analisa dimensi, instalasi penelitian, dan alat ukur yang digunakan, serta prosedur pengukuran. Selain itu, contoh perhitungan, visualisasi aliran, dan diagram alir penelitian serta metode yang digunakan dalam eksperimen dan simulasi numerik.

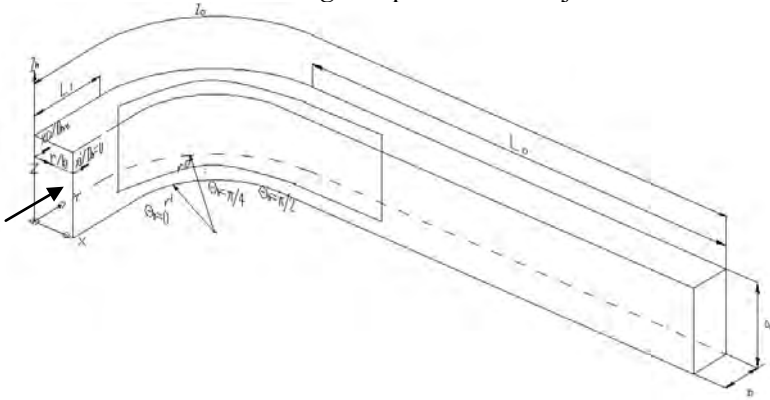
3.1 Analisa dimensi

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu percobaan. Parameter-parameter yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran didalam *elbow* 90^0 yang dilengkapi dengan sudu pengarah adalah sebagai berikut:

- Δp : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi
- ρ : massa jenis fluida
- μ : viskositas absolut fluida
- U_{ref} : kecepatan *freestream* di *inlet elbow* 90^0
- u : kecepatan lokal
- a : tinggi *cross section elbow* 90^0
- b : lebar *cross section elbow* 90^0
- r : posisi pada arah normal terhadap *streamline elbow* 90^0
- x_i : posisi searah *streamline* pada dinding dalam *elbow* 90^0
- x_o : posisi searah *streamline* pada dinding luar *elbow* 90^0
- l_i : panjang total *inner* searah *streamline elbow* 90^0
- l_o : panjang total *outer* searah *streamline elbow* 90^0
- D_h : diameter hidrolis saluran
- θ_h : bilangan untuk menyatakan derajat sudut *elbow* dimulai pada $x_i/D_h = 1,649$ yaitu pada *inlet elbow* 90^0 dan x_i dimulai dari *inlet test section*.
- L_i : panjang *inlet elbow* 90^0
- L_o : panjang *outlet elbow* 90^0



Gambar 3.1 Skema penelitian dan posisi pengukuran tekanan statis dan tekanan *stagnasi* pada metode uji model 1.



Gambar 3.2 Skema penelitian dan posisi pengukuran tekanan statis dan tekanan *stagnasi* pada metode uji model 2.

Parameter yang berpengaruh terhadap perbedaan tekanan dan kecepatan lokal, dengan mengasumsikan Δp dan u sebagai *dependent variable*. Dari persamaan 3.1 didapatkan parameter berdimensi ($n=15$) sebagai berikut :

$$\Delta p, \rho, \mu, b, a, r_b, r_o, r, x_i, x_o, z_h, l_i, l_o, U_{ref}, D_h \quad (3.2)$$

$$u_{local} = f_2(\rho, \mu, b, a, r_b, r_o, r, x_i, x_o, z_h, l_i, l_o, U_{ref}, D_h) \quad (3.3)$$

Dipilih repeating parameter ($m = r = 3$) yang diperoleh dari parameter berdimensi ρ, U_{ref} dan D_h . Dari analisa dimensi akan diperoleh 12 grup tak berdimensi ($n-m = 12$) sebagai berikut:

- *Dependent variable Δp*

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\Delta p}{\rho \cdot U_{ref}}; \Pi_2 = \frac{\mu}{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}; \Pi_3 = \frac{a}{D_h}; \Pi_4 = \frac{b}{D_h}; \Pi_5 = \frac{r_i}{D_h}; \Pi_6 \\ &= \frac{r_o}{D_h}; \\ \Pi_7 &= \frac{r}{D_h}; \Pi_8 = \frac{x_o}{D_h}; \Pi_9 = \frac{x_i}{D_h}; \Pi_{10} = \frac{z_h}{D_h}; \Pi_{11} = \frac{l_i}{D_h}; \Pi_{12} = \\ &\frac{l_o}{D_h} \end{aligned} \quad (3.4)$$

- *Dependent variable u_{local}*

$$\begin{aligned} \Pi_{13} &= \frac{u_{local}}{U_{ref}}; \Pi_{14} = \frac{\mu}{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}; \Pi_{15} = \frac{a}{D_h}; \Pi_{16} = \frac{b}{D_h}; \Pi_{17} \\ &= \frac{r_i}{D_h}; \Pi_{18} = \frac{r_o}{D_h}; \\ \Pi_{19} &= \frac{r}{D_h}; \Pi_{20} = \frac{x_o}{D_h}; \Pi_{21} = \frac{x_i}{D_h}; \\ \Pi_{22} &= \frac{z_h}{D_h}; \Pi_{23} = \frac{l_i}{D_h}; \\ \Pi_{24} &= \frac{l_o}{D_h} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Fungsi yang berhubungan adalah

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{11}, \Pi_{12}) \quad (3.6)$$

$$\Pi_{13} = f(\Pi_{14}, \Pi_{15}, \Pi_{16}, \Pi_{17}, \Pi_{18}, \Pi_{19}, \Pi_{20}, \Pi_{21}, \Pi_{22}, \Pi_{23}, \Pi_{24}) \quad (3.7)$$

Dari analisa dimensi akan didapat 12 grup tak berdimensi sehingga dihasilkan juga fungsi persamaan tak berdimensi yaitu koefisien tekanan (C_p) dan kecepatan tak berdimensi $\frac{u}{U_{ref}}$ sebagai berikut:

$$\frac{1}{2}C_p = \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13})$$

(3.8)

$$\frac{1}{2}C_p = \frac{\Delta p}{\rho \cdot U_{ref}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho \cdot U_{ref}^2 \cdot D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{x_i}{D_h}, \frac{z_h}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}\right)$$

(3.9)

$$\frac{u_{local}}{U_{ref}} = f_2(\Pi_{15}, \Pi_{16}, \Pi_{17}, \Pi_{18}, \Pi_{19}, \Pi_{20}, \Pi_{21}, \Pi_{22}, \Pi_{23}, \Pi_{24}, \Pi_{25})$$

(3.10)

$$\frac{u_{local}}{U_{ref}} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{x_i}{D_h}, \frac{z_h}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}\right)$$

(3.11)

Dari grup tak berdimensi diatas, parameter yang konstan (tidak divariasikan) karena harganya sudah ditentukan sejak awal adalah:

$$\frac{\mu}{\rho \cdot U_{ref}^2 \cdot D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}$$

Parameter yang dianggap konstan dapat dikeluarkan dari fungsi persamaan tak berdimensi. Penelitian ini digunakan bilangan *Reynolds* yang didasarkan pada D_h sehingga didapat $Re_{Dh} = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$, dengan analisa dimensi didapatkan parameter $\frac{r}{b}$ yang dinyatakan dalam perhitungan sebagai berikut:

- *Dependent variable Δp*

$$\Pi_{13} = \frac{\Pi_7}{\Pi_4} = \frac{\frac{r}{D_h}}{\frac{b}{D_h}} = \frac{r}{b} \quad (3.12)$$

- *Dependent variable u*

$$\Pi_{25} = \frac{\Pi_{19}}{\Pi_{16}} = \frac{\frac{r}{D_h}}{\frac{b}{D_h}} = \frac{r}{b} \quad (3.13)$$

Dalam hal ini D_h dinyatakan dalam bentuk persamaan 3.13 berikut ini:

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (3.14)$$

Dari beberapa pertimbangan di atas maka dapat ditulis persamaan 3.15 dan 3.16 sebagai berikut:

$$Cp = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho \cdot U_{ref}^2} = f\left(\frac{x_i}{l_i}, \frac{x_o}{l_o}, \frac{r}{b}\right) \quad (3.15)$$

$$\frac{u}{U_{ref}} = f\left(\frac{x_o}{l_i}, \frac{x_i}{l_o}, \frac{r}{b}\right) \quad (3.16)$$

3.2 Model Uji

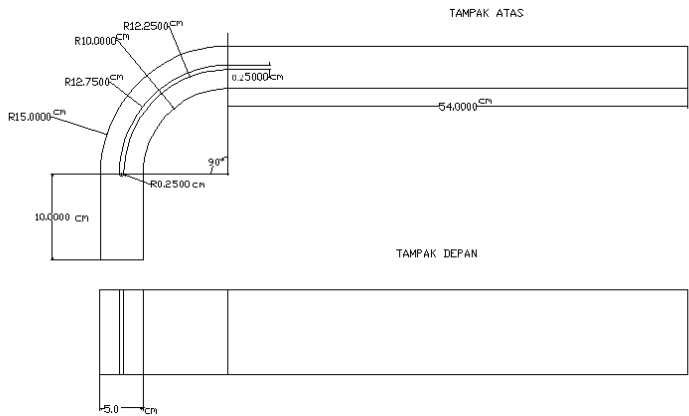
Pada penelitian ini akan digunakan model uji, yaitu *elbow* dengan sudu pengarah model 1 dan 2, spesifikasi sebagai berikut:

3.2.1 **Elbow** (lihat gambar 3.1 dan 3.2)

- *Elbow elbow 90°* : Rectanguler
- Bahan body saluran *elbow* : Akrilik
transparan, tebal 6 mm
- L_i (panjang inlet *elbow*) : 100 mm
- L_o (panjang outlet *elbow*) : 540 mm
- a (tinggi) : 100 mm
- b (lebar) : 50 mm
- D_h (diameter hidrolik) : 125 mm
- R_m/D_h : 100 mm
- r_o : 150 mm
- r_i : 100 mm
- r_m : 1,875

3.2.2 Sudu Pengarah
3.2.2.1 Model 1

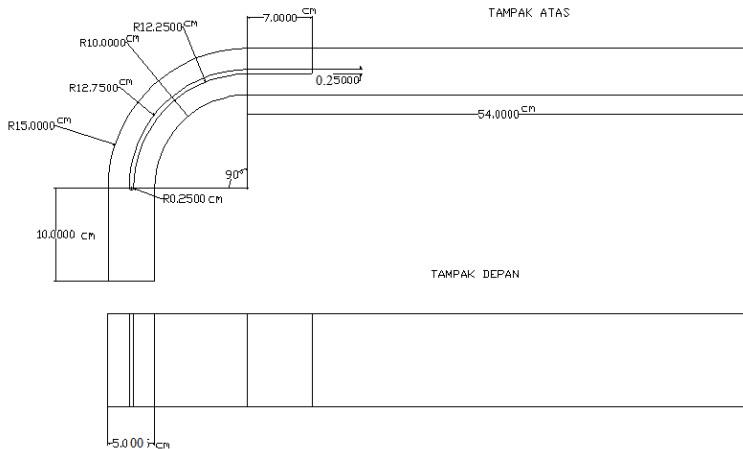
- Bahan : PVC
- Tebal sudu pengarah : 2.5 mm
- Kelengkungan *leading edge* : 2.5 mm



Gambar 3.3 Sudu pengarah model 1.

3.2.2.2 Model 2

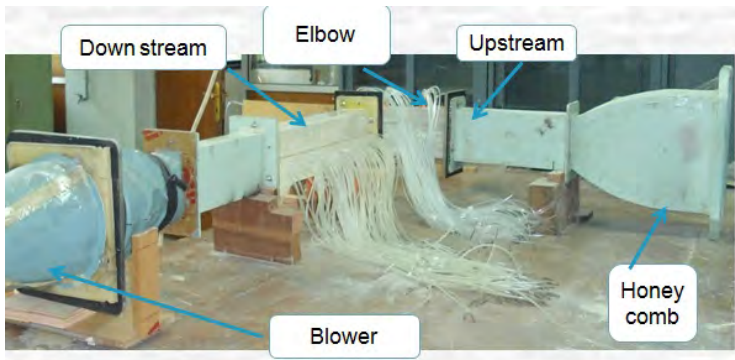
- Bahan : PVC
- Tebal sudu pengarah : 2.5 mm
- Kelengkungan *leading edge* : 2.5 mm
- Perpanjangan *sudu pengarah* : 70 mm



Gambar 3.4 Sudu pengarah model 2.

3.3 Instalasi penelitian

Untuk mendukung penelitian maka dibuat suatu instalasi penelitian (Gambar 3.5). Instalasi penelitian adalah rangkaian dari beberapa komponen utama, diantaranya adalah:



Gambar 3.5 Instalasi penelitian.

3.3.1 *Blower*

Gambar 3.6 *Centrifugal blower*.

Pada penelitian ini digunakan tipe *centrifugal blower* (Gambar 3.6) yang memiliki karakteristik antara lain:

Merek : CKE (model ED190).
 Tipe : *Direct Centrifugal Blower*
 Kapasitas : 4,8 m³/menit
 Daya : 1,1 kW.
 Putaran : 2800 rpm

3.3.2 *Honey Comb*

Honey comb berfungsi untuk membuat aliran dalam kondisi mendekati *uniform* saat memasuki instalasi serta mengurangi derajat *turbulensi* aliran (Gambar 3.7).

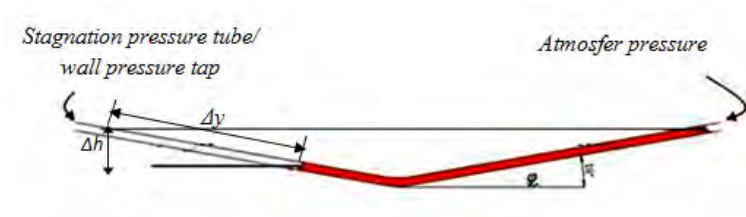


Gambar 3.7 *Honey comb*.

3.4 Alat Ukur

Alat ukur tekanan *statis* dan tekanan *stagnasi* yang digunakan pada penelitian yaitu:

1. *Wall pressure tap*
Wall pressure tap digunakan untuk mengukur tekanan *statis* pemasangannya di sepanjang dinding lokasi pengukuran.
2. *Stagnation pressure tube (Pitot tube)*
Pitot tube digunakan untuk mengukur tekanan *stagnasi* dengan diameter luar sebesar 0,7 mm. Pergeseran titik pengukuran secara horizontal pada setiap *cross section* yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran 2,5 mm.
3. *Inclined manometer (Manometer V)* dan *Mistar*
Manometer digunakan untuk pembaca perbedaan tekanan yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* (Gambar 3.8).



Gambar 3.8 *Inclined manometer dan mistar.*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 0.5 mm
- Fluida kerja : Red oil ($SG = 0,82$)
- Sudut kemiringan : 15^0

Tabel 3.1 Posisi pengukuran *pressure tap* pada *rectangular elbow* 90°.

| <i>Inner wall</i> | | <i>Outer wall</i> | |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| Posisi pengukuran | Jarak dari inlet (mm) | Posisi pengukuran | Jarak dari inlet (mm) |
| <i>Section 1</i> | 0 | <i>Section 1</i> | 0 |
| <i>Section 2</i> | 100 | <i>Section 2</i> | 100 |
| <i>Section 3</i> | 115.7 | <i>Section 3</i> | 123.55 |
| <i>Section 4</i> | 131.4 | <i>Section 4</i> | 147.1 |
| <i>Section 5</i> | 147.1 | <i>Section 5</i> | 170.65 |
| <i>Section 6</i> | 162.8 | <i>Section 6</i> | 194.2 |
| <i>Section 7</i> | 297.8 | <i>Section 7</i> | 329.2 |
| <i>Section 8</i> | 432.8 | <i>Section 8</i> | 464.2 |
| <i>Section 9</i> | 567.8 | <i>Section 9</i> | 599.2 |
| <i>Section 10</i> | 702.8 | <i>Section 10</i> | 734.2 |

3.5 Langkah-langkah eksperimen

Beberapa tahap yang dilakukan pada penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan data kuantitatif
2. Pengolahan data kuantitatif
3. Studi dan visualisasi numerik kualitatif dan kuantitatif.

3.5.1 Pengambilan data kuantitatif

Parameter yang diukur pada penelitian ini meliputi tekanan *stagnasi* dan tekanan *statis*. Sebelum melakukan pengambilan data maka perlu dilakukan pengukuran suhu ruangan terlebih dahulu. Masing-masing pengukuran memiliki prosedur pengambilan data yang berbeda dan akan dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Prosedur pengambilan data tekanan *statis*.

Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:

- a) Persiapan *test suction*.

- b) Penghubung *pressure tap* yang sudah dipasang di dinding ke *inclined manometer* dengan selang kapiler.
 - c) Pencatatan bacaan awal yang ditunjukkan oleh *inclined manometer*.
 - d) Pengaturan bukaan *blower* sesuai kecepatan *free stream* yang akan di set $U_{ref} = 5 \text{ m/s}$.
 - e) Pencatatan bacaan akhir pada *inclined manometer*.
 - f) Melepaskan selang kapiler lalu menghubungkan ke *pressure tap* berikutnya ke *inclined manometer*, sampai *pressure tap* terakhir.
- 2) Prosedur pengukuran tekanan dinamis
- Prosedur pengukuran tekanan dinamis adalah sebagai berikut:
- a) Persiapan *test section*.
 - b) Pemasangan *pitot tube* pada posisi yang ingin diukur.
 - c) Penghubung *pitot tube* dan *pressure tap* ke *inclined manometer* dengan selang kapiler.
 - d) Pencatatan bacaan awal yang ditunjukkan oleh *inclined manometer*.
 - e) Pengaturan bukaan *blower* sesuai keinginan.
 - f) Pencatatan bacaan akhir pada *inclined manometer*.
 - g) Mengulang langkah e-f sampai titik tekanan dinamis terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.

3.5.2 Pengolahan data kuantitatif

Pengolahan data dilakukan dengan membuat sebuah contoh perhitungan. Beberapa data awal yang diperlukan untuk melakukan proses perhitungan adalah :

1. Diameter hidraulik *elbow* (D_h) : 66,7 mm
2. Panjang *upstream* sampai *downstream* pada sisi

- Inner wall (l_i) : 797 mm
- Outer wall (l_o) : 875,5 mm
- 3. Sudut *inclined manomete* r : 15^0
- 4. *Spesific of gravity red oil* (SG_{redoil}): 0,82
- 5. Percepatan gravitasi : $9,81 \text{ m/s}^2$
- 6. Temperatur ruangan dianggap konstan: 25^0 C
- 7. Massa jenis udara pada $T = 25^0 \text{ C}$: $1,19 \text{ kg/m}^3$
- 8. Viskositas kinematis udara pada $T = 28^0 \text{ C}$: $1,54 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
- 9. Massa jenis air pada $T = 25^0 \text{ C}$ (ρ_{H_2O}): 997 kg/m^3

3.5.2.1 Perhitungan untuk menentukan bukaan blower

Eksperimen ini digunakan bilangan *Reynolds* sebesar $2,1 \times 10^4$. Melalui persamaan 3.17 didapatkan kecepatan *center line* (U_{ref}) sebesar 5 m/s.

$$Re_{Dh} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot D_h}{\nu} \quad (3.17)$$

dimana :

- ν : viskositas kinematis udara pada $T = 28^0 \text{ C}$
- μ : viskositas absolute udara pada $T = 28^0 \text{ C}$
- ρ_{ud} : massa jenis udara
- U_{ref} : kecepatan *freestream* udara pada *inlet elbow* ($x_i/D_h = 0$ atau $x_o/D_h = 0$)
- D_h : diameter hidraulik *elbow*

untuk mendapatkan kecepatan awal (U_{ref}) sebesar 5 m/s dilakukan pengaturan bukaan blower secara manual melalui pengukuran nilai Δh . Persamaan 3.18, didapatkan nilai Δh sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{udara} \cdot U_{ref}^2 = SG_{red oil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h$$

$$\Delta h = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref}^2}{2 \cdot SG_{red oil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g}$$

$$\Delta h = \Delta y \cdot \sin \varphi$$

$$\Delta y = \frac{\Delta h}{\sin \varphi} \quad (3.19)$$

3.5.2.2 Perhitungan Koefisien Tekanan (C_p)

Perhitungan koefisien tekanan untuk *elbow* 90° pada sepanjang sisi *inner* dan *outer wall* dari *test section* yaitu bagian *midspan* yang berjarak 25 mm dari dinding atas *elbow*.

Koefisien tekanan (C_p) dirumuskan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot U_{ref}^2} \quad (3.20)$$

dimana :

- $P_{s,i}$: tekanan statis pada *inner wall* di $x_i/D_h = i$
- P_{ref} : tekanan statis referensi pada $x/D_h = 0$
- P_{udara} : massa jenis udara $T = 25^\circ\text{C}$
- U_{ref} : kecepatan referensi pada *inlet section elbow* ($x_i/D_h = x_o/D_h = 0$)

a) Perhitungan $P_{s,i}$

$$\Delta h = \Delta y \cdot \sin \theta$$

$$P_{s,i} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h$$

$$= SG_{redoil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.21)$$

b) Perhitungan P_{ref}

$$\Delta h = \Delta y \cdot \sin \theta$$

$$P_{ref} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h$$

$$(3.22)$$

c) Perhitungan C_p

$$C_p = \frac{P_{s,i} - P_{ref}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot U_{ref}^2}$$

$$(3.23)$$

3.5.2.3 Perhitungan Pressure Drop (Δp)

Pressure drop adalah selisih tekanan *inlet* dan *outlet* pada *test suction*. *Pressure drop* pada model 1 dan 2

diukur di posisi $x_i/D_h = 0$; $x_o/D_h = 0$ dan posisi $x_i/D_h = 10.8$; $x_o/D_h = 11$. Diasumsikan tekanan di posisi *inlet* dan *outlet* sama.

- Perhitungan Δp model 1

$$\Delta p_1 = P_{s,0 \text{ inlet}} - P_{s,160 \text{ outlet}} \quad (3.24)$$

- Perhitungan Δp model 2

$$\Delta p_2 = P_{s,0 \text{ inlet}} - P_{s,160 \text{ outlet}} \quad (3.25)$$

Dua parameter berupa tekanan statis dan stagnasi digunakan untuk menghitung *pressure coefficient* dan *velocity profile*, kemudian dari parameter – parameter tersebut akan diplot grafik – grafik sebagai berikut :

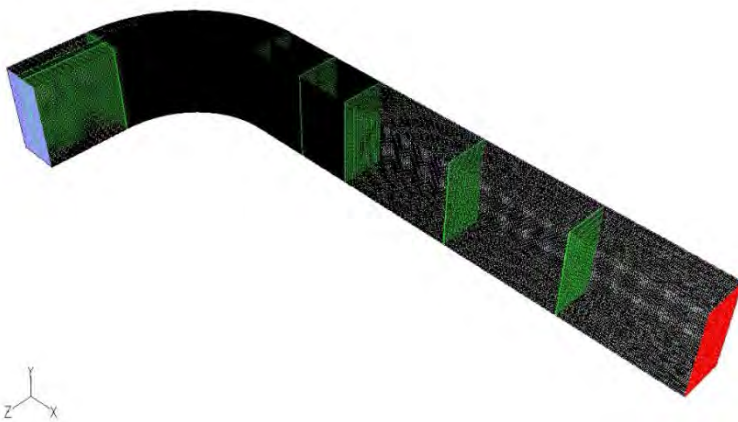
1. Grafik koefisien tekanan (C_p) fungsi sumbu x_i/D_h pada *inner wall* untuk masing – masing bilangan *Reynolds*, $C_p = f(x/D_h, Re_{Dh})$.
2. Grafik koefisien tekanan (C_p) fungsi sumbu x/D_h pada *outer wall* untuk masing – masing bilangan *Reynolds*, $C_p = f(x/D_h, Re_{Dh})$
3. Grafik kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}) fungsi sumbu r pada posisi $z_h = 0$, $x_i/D_h = 0$; 1.499; 1.734; 1.964; 2.205; 2.515; 4.464; 6.488; 8.512; 10.536 dan pada sisi *outer wall* dan pada masing – masing bilangan *Reynolds*, $u/U_{ref} = f(x_i/D_h, r/b, Re_{Dh})$.

3.5.3 Studi numerik

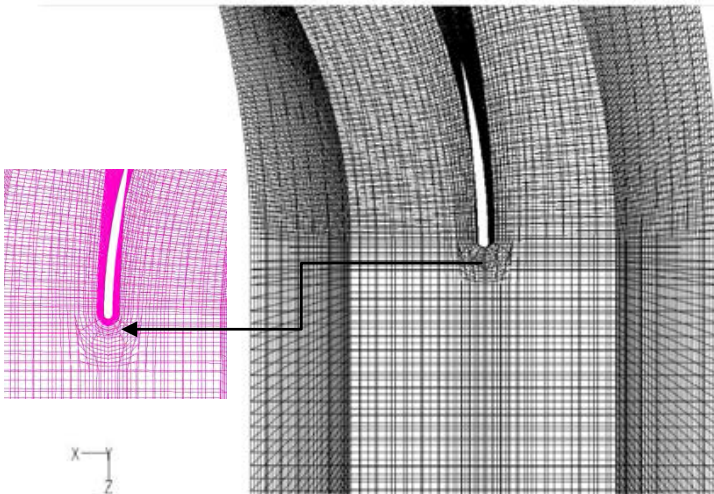
Penelitian numerik digunakan untuk mengetahui informasi yang tidak didapatkan dari hasil eksperimen atau percobaan. Numerik menggunakan visualisasi numerik 3-D dan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan program *Fluent 6.3.26* dan *Gambit 2.4.6*. Dengan langkah – langkah sebagai berikut :

- 1) *Grid* adalah langkah yang dilakukan dengan mengimport grid yang telah dibuat pada *software Gambit 2.30*. Proses yang digunakan adalah menggambar model benda uji (*prototype*) berupa *rectangular elbow 90°* serta *test section* berupa

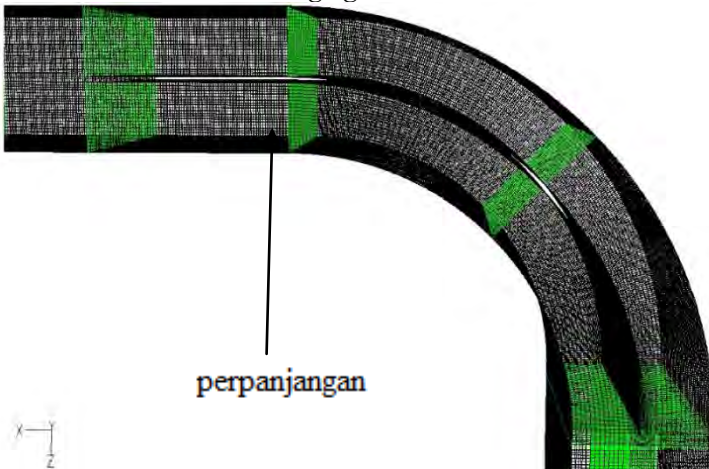
upstream dan *downstream*. Kemudian membuat *mesh volume* dengan model map yang dapat dilihat pada gambar 3.8. Gambar 3.9 menunjukkan *mesh* pada model benda uji 2 di daerah *rounded* sedangkan gambar 3.10 menunjukkan mesh pada model benda uji 2 untuk daerah sudu pengarah diperpanjang.



Gambar 3.9 *Meshing volume* pada *elbow* model 2.



Gambar 3.10 *Meshing elbow* model benda uji 2 di daerah *leading edge guide vane*.

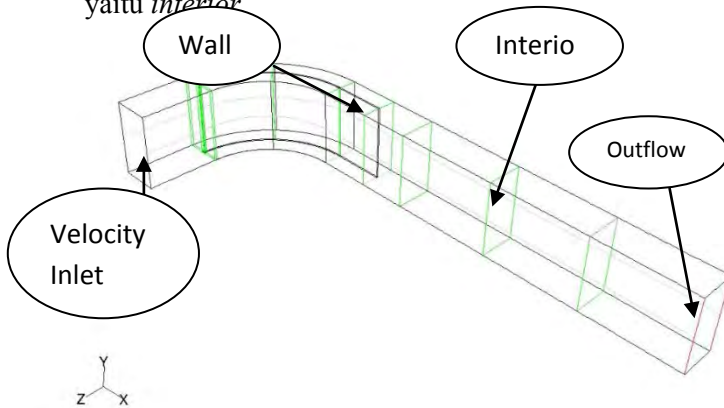


Gambar 3.11 *Meshing elbow* pada model 2 dengan sudu pengarah yang diperpanjang.

- 2.) Models merupakan permodelan karakteristik aliran, berupa penentuan jenis dan formula penyelesaian

(*solver*), penentuan model turbulen yang akan digunakan. Jenis penyelesaian yang digunakan adalah *double precision* dan formula penyelesaian *segregate*. Model turbulen yang dipakai adalah *k-omega SST*.

- 3.) *Materials* merupakan penetapan jenis material yang akan digunakan adalah udara dengan densitas $1,182 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas kinematis $1,57 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.
- 4.) *Operating Condition* merupakan perkiraan kondisi daerah operasi yang biasanya merupakan perkiraan tekanan pada daerah operasi, yaitu sebesar 101325 Pascal.
- 5.) *Boundary Condition* adalah penentuan parameter – parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran. Gambar 3.12 menunjukkan kondisi batas *inlet*, *wall*, dan *outlet*. Kondisi batas *inlet* adalah *velocity inlet* sebesar $U_{ref} \approx 5 \text{ m/s}$ ($Re_{Dh} \approx 2,1 \times 10^4$), $D_h = 0.0667 \text{ m}$, *Turbulent Length Scale* = 0.05 m, *Turbulent intensity* = 5%, dan *Turbulent viscosity* = 5%. Kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. Sedangkan pada *inner wall* dan *outer wall* serta pada sudu pengarah menggunakan kondisi batas *wall*. Kondisi batas tiap *section* menggunakan *boundary condition* yaitu *interior*.



Gambar 3.12 *Boundary condition* domain penelitian.

- 6.) *Solution* adalah tahap penyelesaian masalah berupa proses iterasi sampai mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan, dalam permodelan ini harganya sebesar 10^{-6} .
- 7.) Grid Independensi diperlukan untuk mendapatkan hasil data yang tidak dipengaruhi oleh jumlah *grid* sehingga data yang diperoleh lebih akurat. Langkah ini akan diperoleh *grid* yang paling optimal sehingga diperoleh data numerik yang dapat dibandingkan dengan data hasil eksperimen. Menurut **Nicholas**, dkk (2004), penentuan *grid* yang paling baik didasarkan pada jumlah *grid* dimana perubahan nilai yang ditinjau tidak berubah secara signifikan. Setelah itu dipilih *mesh* dengan total *grid* yang paling sedikit dengan tujuan untuk meminimalkan penggunaan *memory* computer dan tidak membutuhkan waktu yang lama. Pada penelitian ini akan digunakan analisa grid independensi *pressure coefficient*. Tabel 3.2 menunjukkan variasi *meshing* model uji pada permodelan 3D. *Meshing* A merupakan *meshing* yang paling renggang dengan jumlah *grid* 444554 sedangkan *meshing* D adalah *meshing* yang paling rapat dengan jumlah *grid* 695700.

Tabel 3.2 Analisa *grid* independensi C_p pada model 2 di posisi (x/D_h)

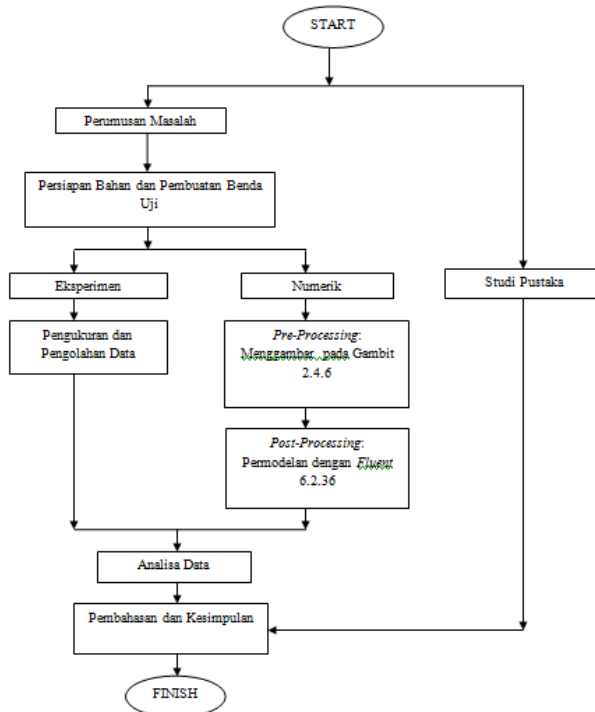
| Meshing | Total Grid | Nilai C_p |
|---------|------------|-------------|
| A | 444554 | -0.07811 |
| B | 582400 | -0.07346 |
| C | 695700 | -0.07309 |
| D | 750600 | -0.07053 |

Berdasarkan tabel 3.2 terlihat bahwa *mesh* B dan C menghasilkan nilai C_p yang paling mendekati. Selisih antara *meshing* B dan C \pm sehingga dipilih variasi *meshing* C untuk melakukan solusi numerik pada

permodelan *fluent*. Hal ini dikarenakan dengan jumlah *grid* yang lebih sedikit dari *meshing* sudah dapat menghasilkan nilai C_p yang relatif sama.

- 8.) *Postprocessing*. Merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh. Penggunaan model numerik dapat menghasilkan kontur tekanan statis, kontur tekanan total, vector kecepatan kontur kecepatan dan *pathline*. Dihasilkan juga plot grafik koefisien tekanan statis.

Secara keseluruhan proses diatas dapat digambarkan dalam diagram alir pada gambar 3.13.



Gambar 3.13 *Flowchart* penyelesaian tugas akhir.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

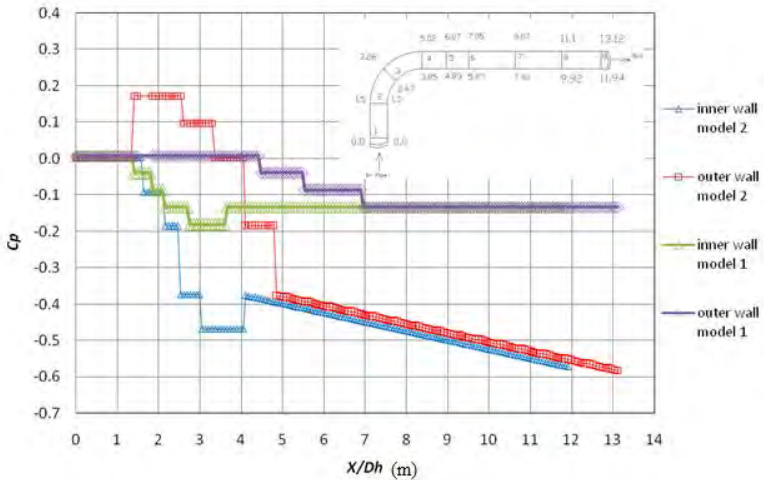
Pada bab ini akan ditampilkan data yang bersifat kuantitatif dan kualitatif untuk menjelaskan fenomena aliran didalam *rectangular elbow 90°* dengan model 1 dan 2. Nilai *pressure drop* sebagai parameter utama untuk melihat pengaruh dari sudut pengarah. Data yang digunakan merupakan hasil studi eksperimen dan numerik yang telah dilakukan dari permasalahan dalam tugas akhir. Hasil dan analisa pada *rectangular elbow 90°* dengan model 2 bisa difokuskan pada distribusi koefisien tekanan (C_p), distribusi profile kecepatan pada 9 *section* dan aliran sekunder yang terjadi pada aliran.

4.1 Distribusi Koefisien Tekanan (C_p)

Untuk mendiskripsikan persamaan gerak pada aliran fluida disepanjang streamline dapat dibagi menjadi dua yaitu aliran searah *streamline* (*s*) dan tegak lurus *streamline* (*r*). Berikut ini akan dijelaskan distribusi koefisien tekanan searah dan tegak lurus *streamline*.

4.1.1 Distribusi Koefisien Tekanan Searah Streamline

Dalam pembahasan ini daerah analisa dibagi menjadi tiga, yaitu daerah *upstream*, *elbow* dan *downstream*. Daerah *upstream* dan *downstream* berupa saluran lurus (*straight duct*). Pembahasan dilakukan dengan meninjau setiap sisi, yaitu sisi *inner* dan *outer*. Karakteristik aliran dijelaskan dengan mengacu kepada distribusi *wall pressure coefficient* (C_p) sebagai representasi dari distribusi tekanan sedangkan distribusi tekanan statis ditunjukkan dari hasil simulasi numerik.



Gambar 4.1 Distribusi C_p inner dan outer wall rectangular elbow 90° dengan model 1 dan 2 (eksperimen).

Gambar 4.1 menjelaskan penelitian eksperimen distribusi koefisien tekanan (C_p) pada rectangular elbow 90° dengan model 1 dan 2. Distribusi nilai C_p pada masing-masing elbow sepanjang dinding inner dan outer mempunyai nilai minimum dan maksimum yang berbeda.

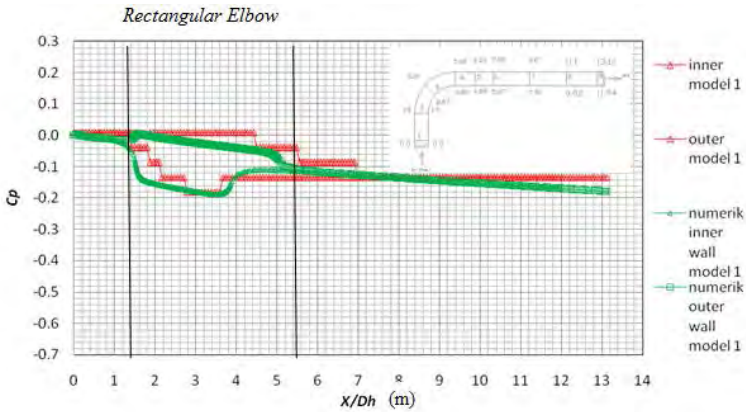
Model 1 didapatkan nilai inner minimum pada eksperimen sebesar -0.1806. Nilai maksimum outer pada eksperimen didapatkan sebesar 0.0077 dengan selisih C_p antara inner dan outer model 1 sebesar 0.1883. Model 2 pada sisi inner mempunyai nilai minimum pada eksperimen sebesar -0,5805 sedangkan pada sisi outer mempunyai nilai maksimum 0.1723 dengan selisih antara sisi outer dan inner sebesar 0.7501.

Model 2 memiliki selisih C_p di inner dan outer yang besar daripada model 1. Semakin besar selisih tekanan antara

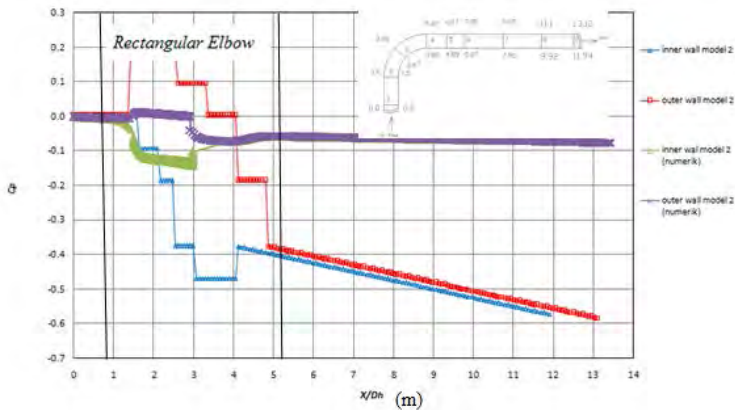
dinding *inner* dengan dinding *outer elbow* maka akan semakin memacu terjadinya *secondary flow*. Hal ini dikarenakan dengan semakin besar selisih tekanan antara dinding *inner* dengan dinding *outer* maka aliran akan semakin mudah untuk bergerak dari tekanan yang tinggi menuju tekanan yang rendah. Distribusi nilai C_p sisi *inner* untuk semua *elbow* cenderung mengalami penurunan yang signifikan yang menandakan bahwa pada daerah tersebut terjadi penurunan tekanan atau *favorable pressure gradient* ($\frac{\partial p}{\partial x} < 0$) yaitu suatu kondisi daerah dengan gradien tekanan negatif akibat dari radius kelengkungan *elbow* yang kecil sehingga aliran fluida tidak bisa mengikuti kontur saat berbelok. Distribusi nilai C_p sisi *outer* untuk semua *elbow* cenderung mengalami kenaikan yang signifikan yang menandakan bahwa pada daerah tersebut terjadi kenaikan tekanan atau *adverse pressure gradient* ($\frac{\partial p}{\partial x} > 0$) yaitu suatu kondisi daerah dengan *gradient* tekanan positif.

Perbedaan nilai C_p antara *inner* dengan *outer wall* secara tidak langsung menunjukkan potensi terjadinya aliran sekunder didalam *elbow* itu sendiri. Semakin besar perbedaan nilai C_p antara *inner* dengan *outer* maka semakin besar pula potensi terjadinya *secondary flow* sebaliknya semakin kecil nilai perbedaannya maka akan semakin kecil pula potensi terjadinya *secondary flow* pada *elbow*. Dengan bilangan *Reynolds* yang sama maka ΔC_p yang paling tinggi terdapat pada *elbow* 90° model 2 dan ΔC_p yang paling rendah terdapat pada *elbow* 90° model 1.

Untuk lebih detail menganalisa pengaruh variasi sudut pengarah terhadap distribusi C_p , maka disajikan grafik perbandingan distribusi C_p dengan eksperimen dan numerik pada *elbow* model 1 dan 2 pada gambar 4.2 dan 4.3.



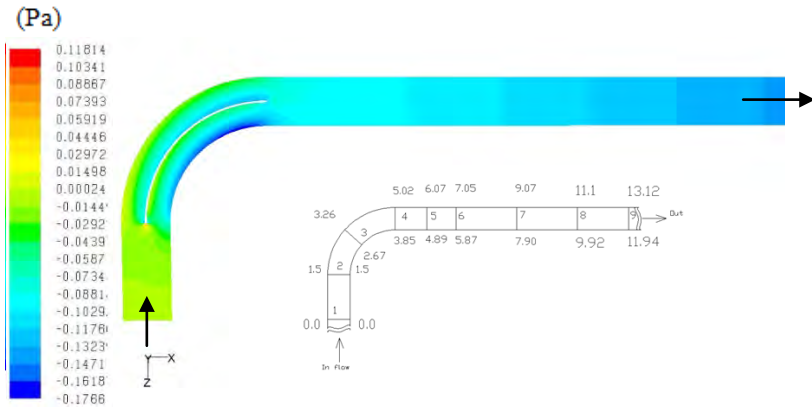
Gambar 4.2 Distribusi C_p inner dan outer wall rectangular elbow 90° model 1 (eksperimen dan numerik).



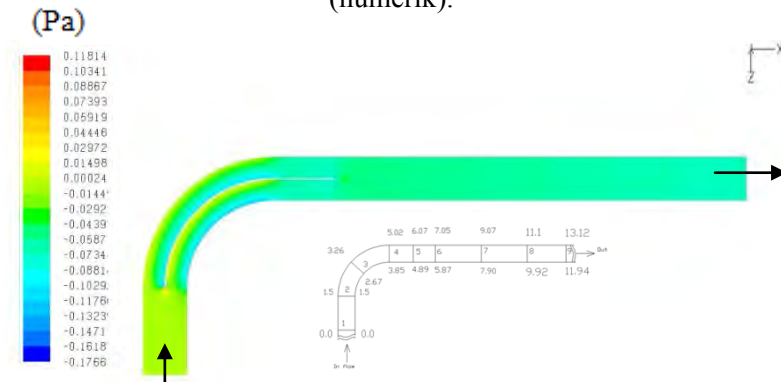
Gambar 4.3 Distribusi C_p inner dan outer wall rectangular elbow 90° model 2. (eksperimen dan numerik).

Gambar 4.2 dan 4.3 menunjukkan perbandingan nilai C_p secara eksperimen dan numerik model 1 dan 2. Pada perbandingan grafik, hasil numerik cenderung menunjukkan data yang lebih kontinyu karena data yang dihasilkan lebih banyak dibanding dengan eksperimen.

Elbow model 1 didapatkan nilai *inner* minimum pada eksperimen sebesar -0.1806 sedangkan pada numerik sebesar -0.1874. Nilai maksimum *outer* pada eksperimen didapatkan sebesar 0.0077 sedangkan pada numerik didapatkan nilai sebesar 0.0099. Selisih C_p antar *inner* dan *outer* pada eksperimen sebesar 0.1883 sedangkan pada numerik sebesar 0.1972. *Elbow* model 2 didapatkan nilai *inner* minimum pada eksperimen sebesar -0.58 sedangkan pada numerik sebesar -0.1511. Nilai maksimum *outer* pada eksperimen didapatkan sebesar 0.1712 sedangkan pada numerik didapatkan nilai sebesar 0.1851. Selisih C_p antar *outer* dan *inner* pada eksperimen sebesar 0.7522 sedangkan pada numerik sebesar 0.03512.



Gambar 4.4 Kontur tekanan statis di *midspan elbow* 90° model 1 (numerik).



Gambar 4.5 Kontur tekanan statis di *midspan elbow* 90° model 2 (numerik).

Gambar 4.4 menunjukkan kontur tekanan statis untuk model 1 di daerah *upstream* aliran mempunyai tekanan yang cenderung *uniform*. Saat memasuki *elbow* aliran mulai mendapatkan pengaruh dari kontur saluran yang berbelok 90°. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pada daerah *elbow*, tekanan

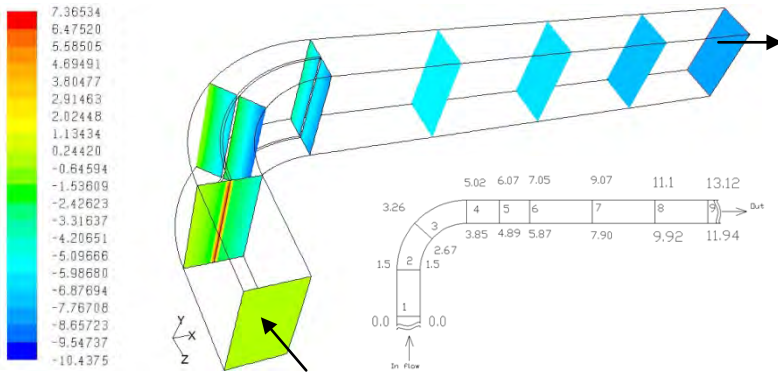
minimum terjadi pada sisi *inner* dan tekanan maksimum pada sisi *outer*.

Gambar 4.5 pada *elbow* 90° model 2, kontur tekanan statis di daerah *upstream* aliran mempunyai tekanan yang cenderung *uniform*. Saat memasuki *elbow* aliran mulai mendapatkan pengaruh dari kontur saluran yang berbelok 90°. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pada daerah *elbow*, tekanan minimum terjadi pada sisi *inner* dan tekanan maksimum pada sisi *outer*. Nilai kuantitatif tekanan statis minimum ditunjukkan dengan kontur biru tua berada disisi *inner*, sedangkan untuk tekanan statis maksimum ditunjukkan dengan kontur berwarna hijau pada sisi *outer*.

Perbedaan tekanan yang besar antara sisi *outer* dengan sisi *inner* akan menyebabkan *secondary flow*. *Secondary flow* inilah dapat menyebabkan terjadinya *blockage area* atau pengecilan luas penampang aliran utama akibat sirkulasi searah radial. Sehingga *effective area* berkurang sehingga dapat meningkatkan *pressure drop* aliran di dalam *elbow*.

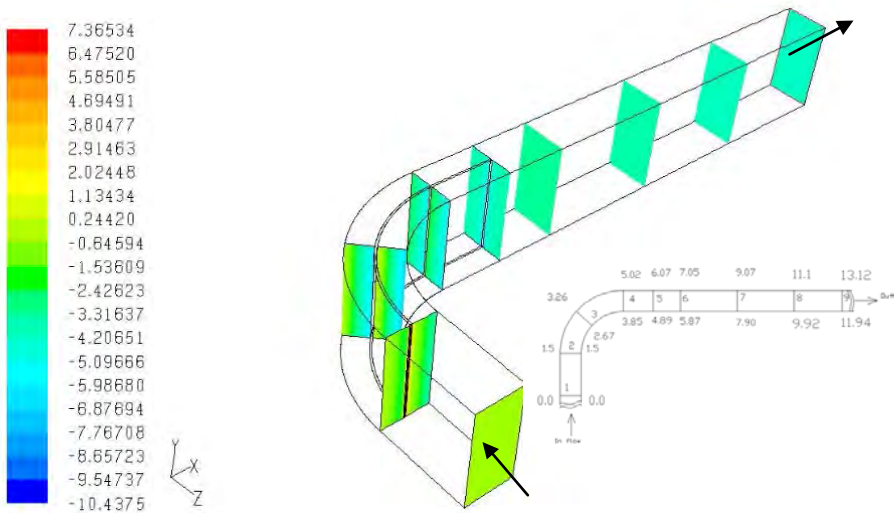
Gambar 4.6 terlihat bahwa pada saat aliran berada di *upstream* mempunyai tekanan statis yang masih *uniform*. Semakin mendekati *elbow* (dapat dilihat pada *section 2*, tekanan aliran fluida mulai mendapatkan pengaruh dari adanya radius kelengkungan *elbow*. Penurunan tekanan statis mulai terjadi pada sisi *inner* yang ditunjukkan dengan kontur warna biru muda sedangkan sisi *outer* dengan kontur warna kuning tua. Pada *section 2* terjadi perbedaan tekanan yang ditunjukkan oleh kontur warna biru tua pada sisi *inner* sedangkan tekanan tinggi pada sisi *outer* ditunjukkan oleh kontur warna hijau. Ini menandakan terdapat perbedaan tekanan yang besar antara sisi *inner* dan *outer*. Mendekati *section 4* selisih tekanan yang terjadi semakin rendah. Hal ini terlihat dari kontur warna biru tua pada *inner* dan warna biru muda pada sisi *outer*. Pada *section 5-8* perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer* semakin kecil dan *uniform* terlihat pada kontur biru pada sisi *inner* dan *outer*.

Gambar 4.7 terlihat bahwa pada saat aliran berada di *upstream* mempunyai tekanan statis yang masih *uniform*. Semakin mendekati *elbow* (dapat dilihat pada *section 2*, tekanan aliran fluida mulai mendapatkan pengaruh dari adanya radius kelengkungan *elbow*. Penurunan tekanan statis mulai terjadi pada sisi *inner* yang ditunjukkan dengan kontur warna biru muda sedangkan sisi *outer* dengan kontur warna kuning tua. Pada *section 2* terjadi perbedaan tekanan yang mencolok yang ditunjukkan oleh kontur warna biru tua pada sisi *inner* sedangkan tekanan tinggi pada sisi *outer* ditunjukkan oleh kontur warna hijau. Ini menandakan terdapat perbedaan tekanan yang besar antara sisi *inner* dan *outer*. Mendekati *section 4* selisih tekanan yang terjadi semakin rendah. Hal ini terlihat dari kontur warna biru muda pada *inner* dan pada sisi *outer*. Pada *section 5-9* perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer* semakin kecil dan *uniform* terlihat pada kontur biru muda pada sisi *inner* dan *outer*.



Gambar 4.6 Kontur tekanan statis (N/m^2) pada 8 *cross section* untuk *elbow model 1* (numerik).

(Pa)



Gambar 4.7 Kontur tekanan statis (N/m^2) pada 9 *cross section* untuk *elbow model 2*, (numerik).

4.1.2 Distribusi Koefisien Tekanan Tegak Lurus *Streamline*

Distribusi C_p searah radial atau tegak lurus *streamline* menjadi pembahasan tersendiri karena berhubungan erat dan saling melengkapi pembahasan distribusi C_p searah *streamline*. Persamaan Euler (persamaan 4.5) menyatakan bahwa apabila suatu aliran fluida melintasi saluran yang mempunyai radius atau kelengkungan, maka tekanan fluida akan sebanding dengan jari-jari kelengkungan. Semakin besar jari-jari kelengkungan, tekanan yang dimiliki juga semakin besar, begitu juga sebaliknya.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{V^2}{r} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{dp}{dr} = \frac{\rho V^2}{r} \quad (4.2)$$

$$dp = \rho V^2 \frac{dr}{r} \quad (4.3)$$

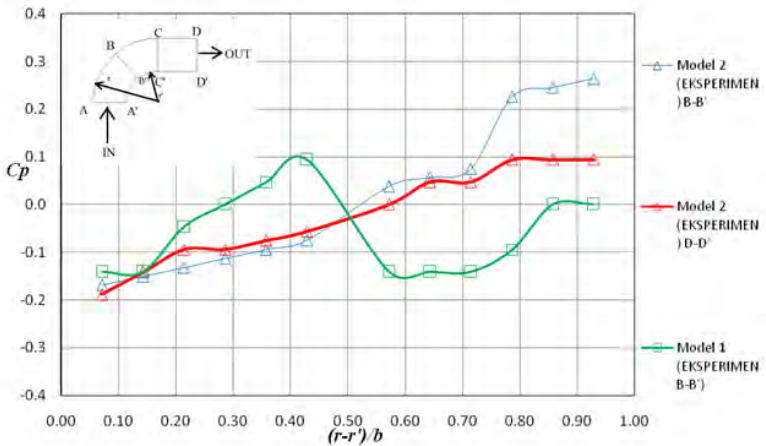
$$\int_1^2 dp = \rho V^2 \int_1^2 \frac{dr}{r} \quad (4.4)$$

$$\Delta p = \rho V^2 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4.5)$$

dimana :

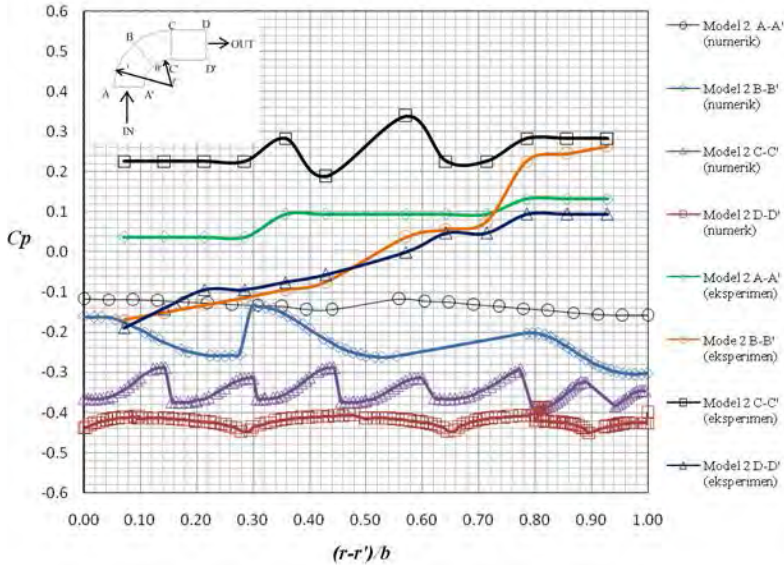
- ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)
- $\frac{\partial p}{\partial r}$: Gradien tekanan searah radial/searah jari-jari (N/m^3)
- V : Kecepatan fluida (m/s)
- r : Jari-jari kelengkungan (m).

Gambar 4.8 menyatakan grafik distribusi C_p searah radial sebagai fungsi posisi r/b , dimana r menunjukkan posisi pengukuran searah radial dan b merupakan lebar penampang saluran sebesar 50 mm. Pengukuran dimulai dari sisi *inner* (A) sampai *outer* (A') untuk *elbow* model 1 terdapat tiga posisi yaitu *inlet elbow* sebagai potongan 1 ($A-A'$), 45° *elbow* sebagai potongan 2 ($B-B'$), dan *outlet elbow* potongan 3 ($C-C'$). Untuk model 2 terdapat empat posisi yaitu *inlet elbow* sebagai potongan 1 ($A-A'$), 45° *elbow* sebagai potongan 2 ($B-B'$), perpanjangan sebagai potongan 3 ($C-C'$), dan *outlet elbow* potongan 4 ($D-D'$).



Gambar 4.8 Distribusi C_p tegak lurus *streamline* pada potongan B-B' untuk *elbow* model 1 dan Potongan B-B' dan D-D' untuk model 2 (Eksperimen).

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa selisih tekanan antara sisi *inner* dan *outer* di potongan B-B' untuk *elbow* model 1 adalah $\Delta C_p = 0.1413$, sedangkan untuk model 2 adalah $\Delta C_p = 0.4333$. Potongan D-D' *elbow* model 2 adalah $\Delta C_p = 0.2826$. Hal ini dikarenakan ketika aliran berada pada daerah *elbow*, aliran akan mengalami peningkatan tekanan sesuai dengan besarnya radius kelengkungannya. Dengan demikian *elbow* model 2 tidak berpengaruh signifikan terhadap ΔC_p .



Gambar 4.9 Distribusi C_p tegak lurus *streamline* untuk model 2 (eksperimen dan numerik).

Grafik pada gambar 4.9 menunjukkan distribusi C_p ke arah radial di dalam model 2 secara numerik didapatkan distribusi C_p dari ke empat potongan baik potongan 1 ($A-A'$), potongan 2 ($B-B'$), potongan 3 ($C-C'$), dan potongan 4 ($D-D'$) mengalami kenaikan dan penurunan dari sisi *inner* menuju *outer*. Selisih C_p yang paling besar adalah pada potongan 3 ($C-C'$) pada numerik sebesar 0.0498.

Hasil eksperimen menunjukkan distribusi C_p yang meningkat baik potongan 1 dengan selisih nilai C_p pada inner dengan outer sebesar 0.0942, potongan 2 sebesar 0.4333, potongan 3 sebesar 0.0565, dan potongan 4 sebesar 0.2826. Selisih nilai C_p yang paling besar terdapat pada potongan 2 ($C-C'$).

Adanya perbedaan nilai C_p antara hasil numerik dengan hasil eksperimen disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya

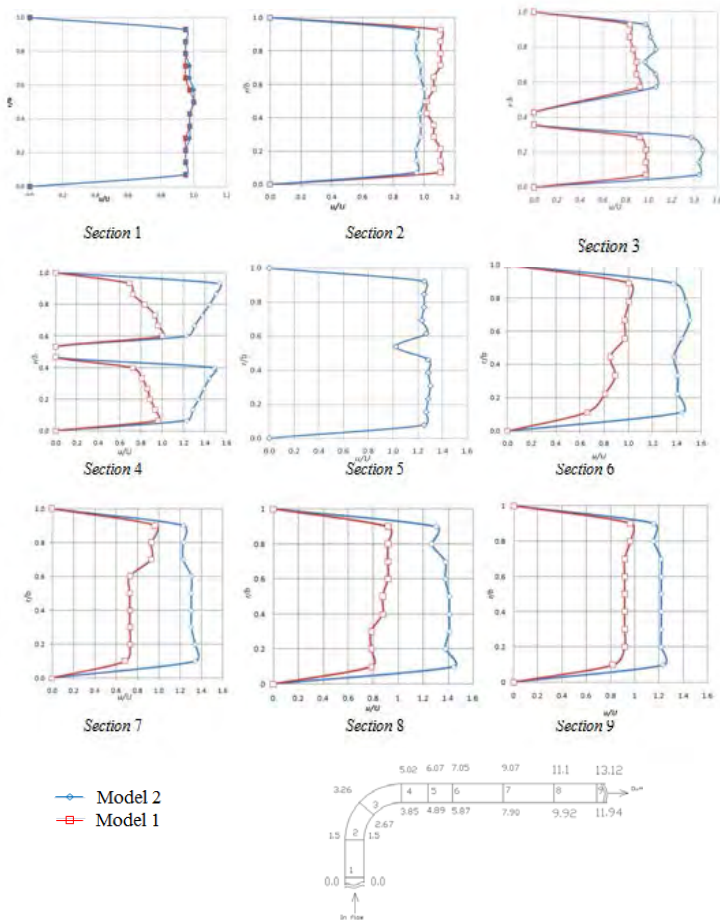
perbedaan titik pengambilan data dimana pada metode numerik lebih banyak sehingga hasil numerik lebih detail dibanding dengan hasil eksperimen. Selain itu alat ukur yang digunakan pada eksperimen kurang memiliki akurasi yang baik. Namun hasil numerik juga memiliki ketidakmampuan dalam memprediksi aliran yang mengandung *adverse pressure gradient* dan aliran sekunder.

4.2 Distribusi Profil Kecepatan

Distribusi tekanan aliran yang melintasi setiap posisi di dalam *rectangular elbow* 90° akan mempengaruhi profil kecepatan yang terjadi pada posisi tersebut. Distribusi kecepatan disajikan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U) fungsi posisi horizontal tak berdimensi (r/w), dimana u adalah kecepatan lokal dan U merupakan kecepatan *maksimum* pada *section* yang sama. Selanjutnya r merupakan posisi pengukuran horizontal dimana $r/b = 2$ adalah sisi *inner* dan $r/b = 3$ sisi *outer*, b didefinisikan sebagai lebar penampang *elbow*. Namun untuk mempermudah pembacaan dalam garfik digunakan $r/w = 0$ untuk mewakili radius dalam dari *elbow* dan $r/w = 1$ untuk mewakili radius luar dari *elbow*. Bagian *upstream* dan *downstream* $r/w = 0$ adalah dinding dalam *elbow* sesuai dengan perpanjangan radius *inner*. Sedangkan pada bagian *upstream* dan *downstream* $r/w = 1$ adalah dinding luar *elbow* sesuai dengan perpanjangan radius *outer*. Berikut ini akan dibahas perkembangan *velocity profile* setiap *section*. Posisi pengukuran setiap *section* dijelaskan sebagai berikut :

- *Section 1* : *inlet straight duct*, posisi $x/D_h = 0$, $x/D_h = 0$, atau 100 mm dari *inlet elbow*.
- *Section 2* : *inlet elbow*, posisi $x/D_h = 1.5$, $x/D_h = 1.5$.
- *Section 3* : 45° *elbow*, posisi $x/D_h = 2.67$, $x/D_h = 3.26$.
- *Section 4* : *elbow*, posisi $x/D_h = 3.85$, $x/D_h = 5.02$.
- *Section 5* : perpanjangan sudu pengarah, posisi $x/D_h = 4.89$, $x/D_h = 6.07$ atau 70 mm dari *outlet elbow*.

- *Section 6* : *outlet straight duct*, posisi $x/D_h = 5.87$, $x/D_h = 7.05$ atau 135 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 7* : *outlet straight duct*, pada posisi $x/D_h = 7.90$, $x/D_h = 9.07$ atau 270 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 8* : *outlet straight duct*, pada posisi $x/D_h = 9.92$, $x/D_h = 11.1$ atau 405 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 9* : *outlet straight duct*, pada posisi $x/D_h = 11.94$, $x/D_h = 13.12$ atau 540 mm dari *outlet elbow*.



Gambar 4.10 Distribusi profil kecepatan masing-masing *section rectangular elbow 90°* untuk *elbow* model 1 dan 2 *section* a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6; g) 7; h) 8; i) 9. (eksperimen).

Secara umum profil kecepatan di sepanjang sisi *upstream* sampai *downstream* dijelaskan sebagai berikut: ketika masuk *test section*, profil kecepatan masih dalam kondisi *uniform*, tepat masuk daerah *elbow*, profil kecepatan cenderung mengalami

defleksi ke sisi *inner*, ditunjukkan dengan adanya tidak simetris pada profil kecepatannya, hal ini mengindikasikan bahwa pada posisi ini sudah tampak adanya pengaruh dari keberadaan *elbow* terhadap karakteristik aliran. Posisi 45° *elbow* profil kecepatan secara jelas mengalami *defleksi*, dimana kecepatan maksimum mulai bergeser menuju sisi *inner*. Keluar *elbow*, profil kecepatan di sisi *inner* dan *outer* secara signifikan menunjukkan perbedaan harga, meskipun kecepatan maksimum mulai bergeser menuju ke tengah. Semakin menjauhi *elbow*, kecepatan maksimum kembali terdefleksi menuju sisi *outer*. Selanjutnya profil kecepatan mengalami proses *recovery* (*recovery process*) untuk mencapai kondisi normal, sebagaimana profil kecepatan pada *straight duct*. Proses *recovery* dilakukan untuk mencapai kestabilan profil pada sisi *inner* dan *outer*. Secara berangsur-angsur profil kecepatan di sisi *inner* mengalami *developing* dengan mendesak profil kecepatan pada sisi *outer*. Untuk lebih jelasnya akan dilakukan pembahasan profil kecepatan pada masing-masing *section* diuraikan pada paragraf berikut.

Profil kecepatan pada *section* 1 untuk model 1 dengan 2 menunjukkan profil yang masih *uniform*. Pada kondisi profil kecepatan *uniform*, pengaruh dari *wall shear stress* sebagai akibat adanya gesekan antara fluida dengan *solid surface* masih sangat kecil. Akibatnya momentum aliran di dekat dinding masih cukup besar sehingga aliran fluida lebih mampu menghadapi hambatan berupa akumulasi gesekan dan gradien tekanan balik.

Section 2 profil kecepatan mulai menunjukkan adanya pengaruh dari radius kelengkungan *elbow*. *Section* 2 terlihat kecepatan aliran maksimum berada di sisi *inner* baik untuk model 1 maupun 2. Saat aliran berada pada sisi *inner* mendekati *inlet elbow* maka aliran akan memasuki daerah *favorable pressure gradient* yaitu daerah bertekanan rendah. Berbeda dengan kondisi aliran pada sisi *outer* yang merupakan daerah *adverse pressure gradient* yaitu daerah bertekanan tinggi.

Section 3 semakin jelas terlihat bahwa kecepatan maksimum aliran berada pada sisi *inner* sama dengan model 1,

hal ini dikarenakan aliran berada pada daerah *adverse pressure gradient*. Aliran pada daerah ini akan mengalami kenaikan tekanan sepanjang aliran dan aliran fluida akan mengalami percepatan yang ditunjukkan kecepatan maksimum berada pada sisi *inner*.

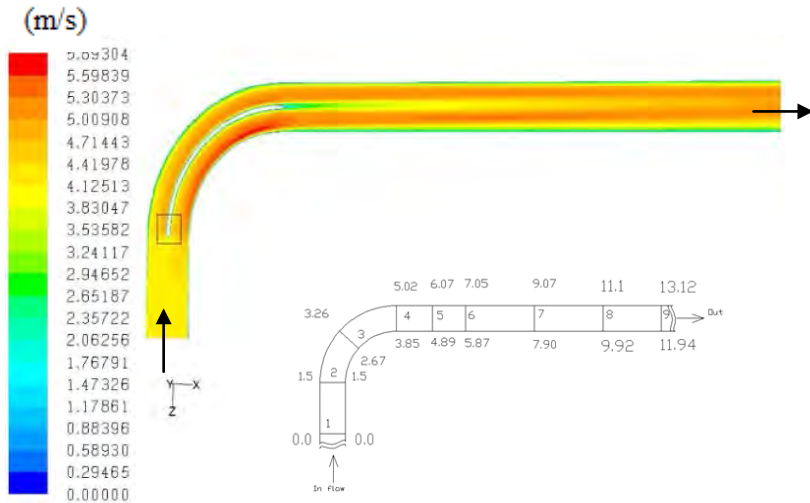
Section 4 menunjukkan transisi kecepatan dari *section 3*. Model 2 terlihat kecepatan minimal masih pada daerah *inner* yang dekat dengan sudu pengarah namun sudah agak bergeser ke *center line* nya. Disini terdapat pergeseran kecepatan yang ditunjukkan dengan bertambahnya kecepatan pada dinding *inner* dan berkurangnya kecepatan pada dinding *outer*. Dari hasil eksperimen dapat dilihat bahwa perubahan kecepatan tidak secara tiba-tiba namun secara bertahap. Model 1 menunjukkan perubahan yang hampir sama tetapi dengan kecepatan yang sedikit lebih kecil dan daerah ini berkecepatan rendah atau dikenal dengan *wake*. Sisi *elbow* secara jelas posisi kecepatan maksimumnya mulai bergeser ke sisi *outer*.

Section 5, profil kecepatan model 2 menunjukkan transisi bergesernya kecepatan dari sisi *inner* ke sisi *outer* karena pada sisi *outer* berada pada daerah *favorable pressure gradient* dan pada daerah *inner* berada pada *adverse pressure gradient*. Ini menunjukkan bahwa keberadaan *elbow* masih membawa pengaruh terhadap karakteristik aliran di sepanjang *straight duct* pada *downstream* profil kecepatan mengalami proses *recovery* untuk menyeimbangkan aliran setelah melewati *wake*.

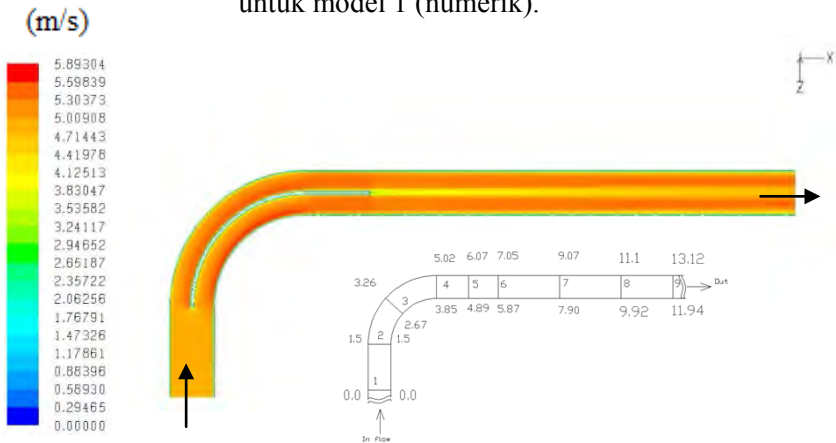
Section 6, profil kecepatan model 2 menunjukkan daerah *outer* berada pada daerah bertekanan rendah sehingga kecepatannya maksimum, kemudian bergeser ke *inner* pada daerah bertekanan tinggi sehingga kecepatannya minimum. *Section 6* merupakan daerah keluar *elbow* yang diperpanjang sudu pengarahnya. Jika dibandingkan dengan model 1, maka model 2 profil kecepatan menunjukkan proses *recovery* lebih cepat daripada model 1 karena *section 6* merupakan daerah *recovery* aliran setelah melewati *elbow*. Profil kecepatan model 2 menunjukkan proses *recovery section 7* sampai *section 9*. *Elbow*

90⁰ model 2 pada *section 9* profil kecepatan sudah menunjukkan kondisi *uniform*. Sedangkan untuk *elbow* dengan model 1 belum mampu membuat kecepatan *outlet elbow* sepenuhnya menjadi *uniform*, perlu jarak tertentu agar *uniform*. Sehingga *elbow* model 2 membuat profil kecepatan menjadi *uniform* lebih cepat dari model 1.

Gambar 4.9 menunjukkan kontour kecepatan *upstream* kecepatan secara keseluruhan *midspan* dan setiap *section* pada model 1. Bagian *upstream* cenderung *uniform* hal ini dikarenakan fluida masih memiliki momentum yang cukup besar untuk melawan gaya gesek yang terjadi pada dinding *elbow*. Secara visualisasi dapat dilihat bahwa area kontur warna antara sisi *inner* dan sisi *outer* adalah sama. Pada *section 2* kecepatan maksimum terjadi di sisi *inner* ditunjukkan dengan warna kuning tua sedangkan pada daerah *outer* kecepatan rendah ditunjukkan dengan kuning muda. *Section 3* kecepatan maksimum terjadi di sisi *inner* ditunjukkan dengan warna merah sedangkan pada daerah *outer* kecepatan rendah ditunjukkan dengan warna hijau dengan perbedaan nilai kecepatan yang lebih tinggi. Pada *section 4* sampai *section 8* terjadi pergeseran kecepatan maksimum dari sisi *inner* menuju sisi *outer*. Profil kecepatan yang dihasilkan di sepanjang *straight duct downstream* belum *uniform*.



Gambar 4.11 Kontur kecepatan (m/s) di *midspan elbow 90°* untuk model 1 (numerik).

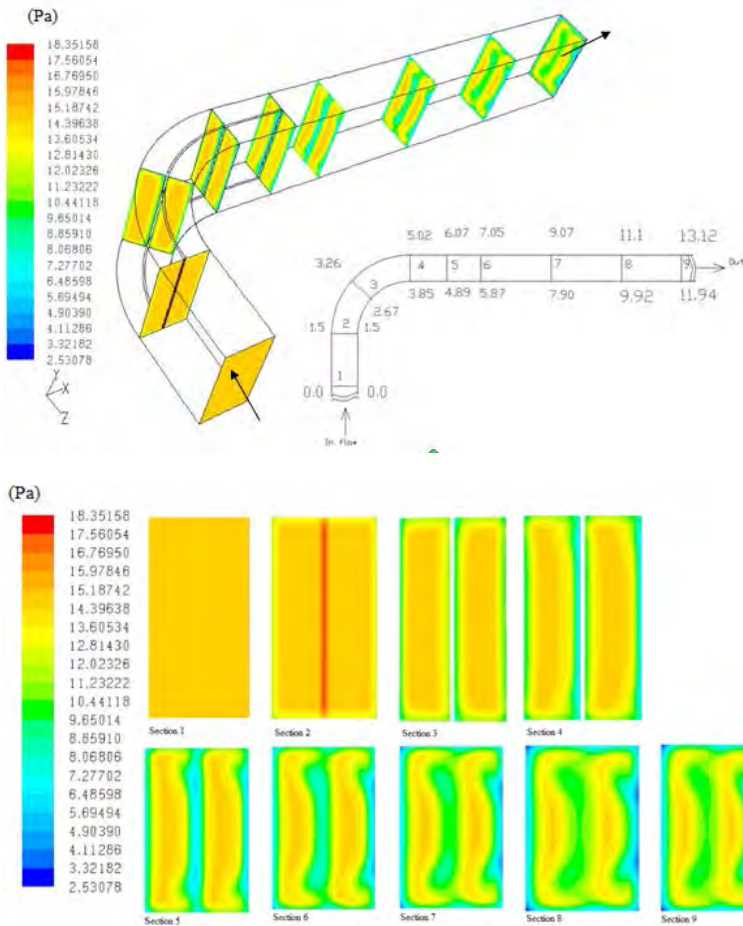


Gambar 4.12 Kontur kecepatan (m/s) di *midspan elbow 90°* untuk model 2 (numerik).

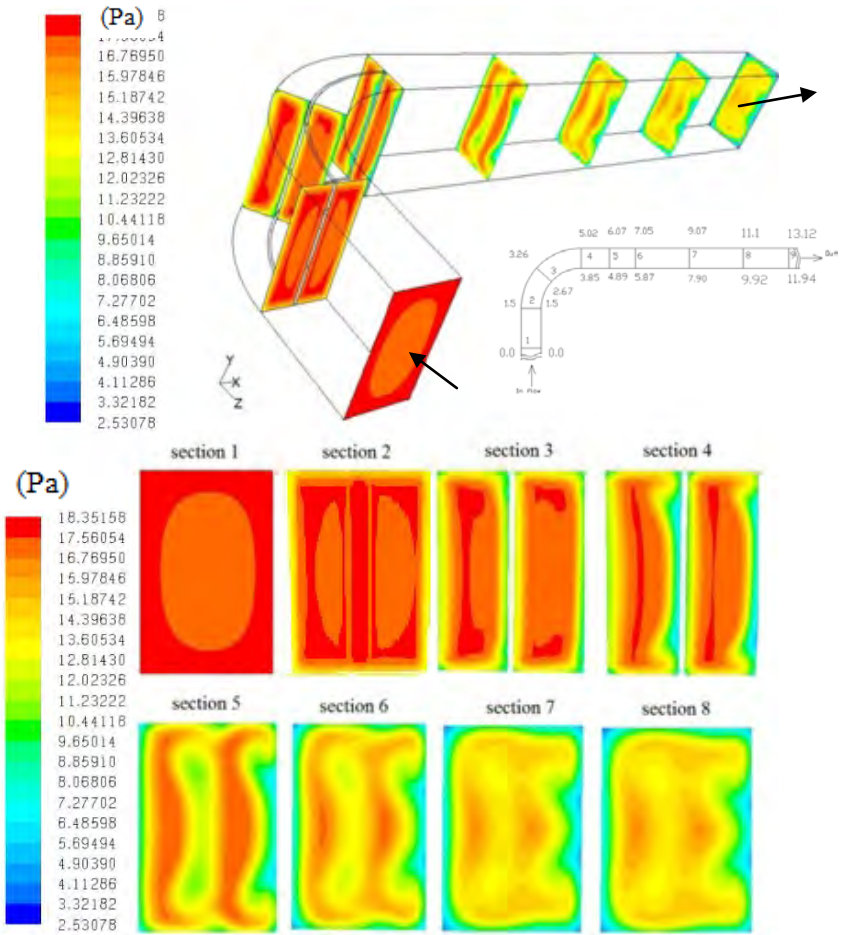
Gambar 4.11 menunjukkan kontur kecepatan secara keseluruhan *midspan* dan setiap *section* pada model 2. Bagian *upstream* kecepatan cenderung *uniform* hal ini dikarenakan fluida

masih memiliki momentum yang cukup besar untuk melawan gaya gesek yang terjadi pada dinding *elbow*. Secara visualisasi dapat dilihat bahwa area kontur warna antara sisi *inner* dan sisi *outer*. *Section 2* kecepatan maksimum terjadi di sisi *inner* ditunjukkan dengan warna merah tua sedangkan pada daerah *outer* kecepatan minimum ditunjukkan dengan kuning muda. *Section 3* kecepatan agak tinggi terjadi di sisi *inner* ditunjukkan dengan warna merah sedangkan pada daerah *outer* kecepatan maksimum ditunjukkan dengan warna hijau dan pada *section 3* ini perbedaan nilai kecepatannya antara *inner* dengan *outer* lebih tinggi dibandingkan dengan *section 2*. *Section 4* dimana kecepatan tingginya berada pada sisi *inner* dan kecepatan kurang tinggi terjadi pada sisi *outer*. Dari *section 4* sampai *section 9* terjadi pergeseran kecepatan maksimum dari sisi *inner* menuju sisi *outer*. Posisi *outlet*, profil kecepatan yang dihasilkan dalam kondisi belum *uniform* di sepanjang *straight duct downstream*.

Gambar 4.11 dan 4.12 dibandingkan antara *elbow* model 1 dan 2. Aliran sekunder sama-sama diprediksi terbentuk dari *section 3* karena hal ini ditunjukkan ketidakseimbangan aliran energi antara sisi *inner* dan *outer*. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat selisih tekanan yang besar antara *inner* dengan *outer* yang akan mengakibatkan selisih nilai C_p yang besar pula.



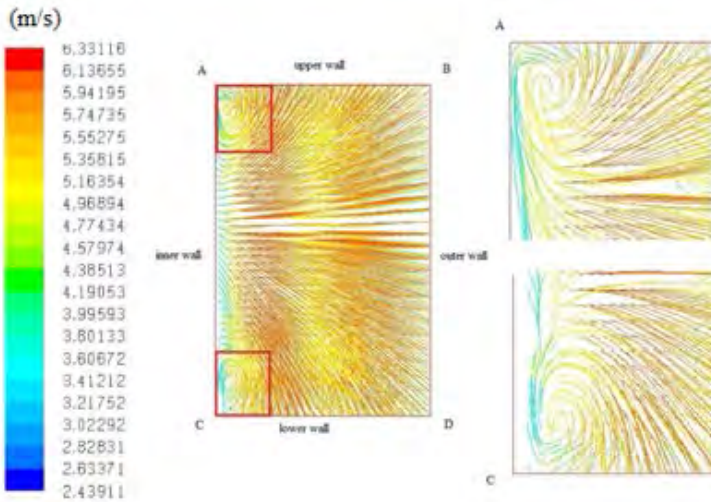
Gambar 4.13 Total pressure di 9 cross section elbow 90° untuk model 2 (a) keseluruhan (b) setiap section (numerik).



Gambar 4.14 Total pressure di 8 cross section elbow 90° untuk model 1 (a) keseluruhan (b) setiap section (numerik).

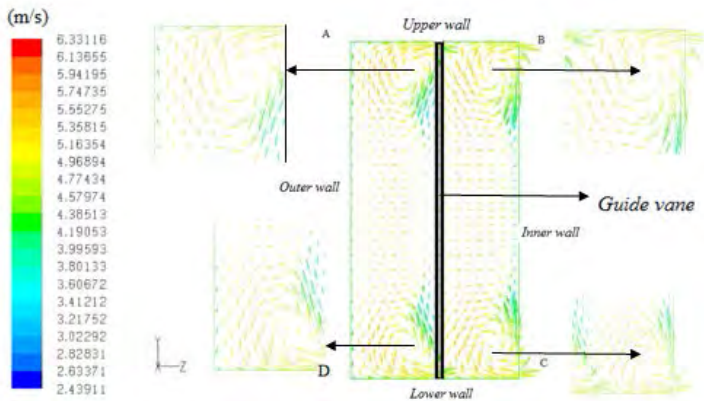
4.3 Secondary Flow

4.3.1.1 Vortex Model 1



Gambar 4.15 Vortex di section 4 model 1 (numerik).

4.3.1.2 Vortex Model 2

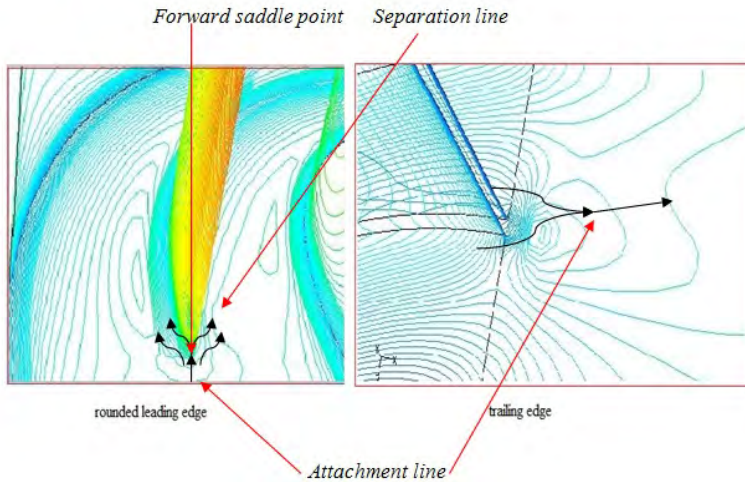


Gambar 4.16 Vortex di section 5 model 2 (numerik).

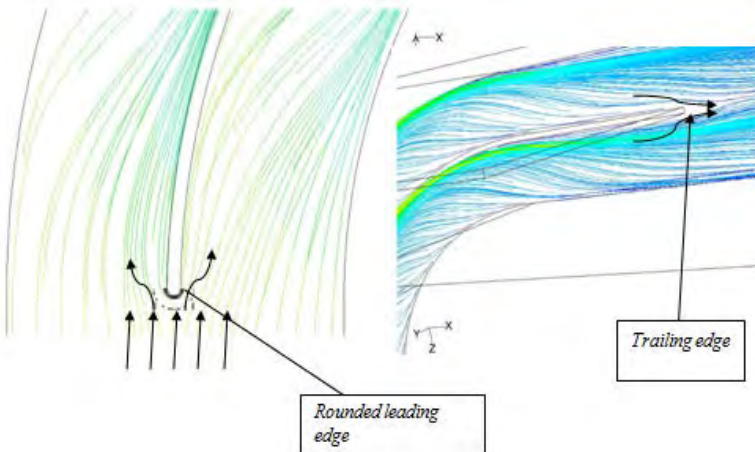
Gambar 4.15 dan 4.16 menunjukkan adanya *vortex flow* pada *elbow*. *Elbow* model 1 terdapat 2 buah *vortex* dan untuk *elbow* model 2 terdapat 4 buah *vortex* yang namun berbeda arah.

Elbow model 1 memiliki pusat *vortex* yang pertama terletak di dekat sudut A sedangkan *vortex* yang kedua terletak di sudut C yang keduanya simetri. Hal ini dikarenakan pada *vortex* yang kedua terletak pada daerah yang bertekanan rendah sedangkan pada *vortex* yang pertama terletak pada daerah yang bertekanan tinggi sehingga menghasilkan *vortex* yang berbeda. *Elbow* model 2 memiliki 4 buah *vortex* yang simetri antara *vortex* di dekat sudut A dengan sudut C dan di dekat sudut B dengan sudut D. *Vortex* simetri antara sudut B dengan C terjadi di *midspan* yaitu pertemuan dinding radius dalam dengan dinding *inner*, sedangkan *vortex* yang simetri sudut A-D terjadi di *midspan* yaitu pertemuan dinding radius luar dengan dinding *guide vane* pada dinding *outer*.

Vortex yang terjadi di sisi corner pada *rectangular elbow* diakibatkan adanya interaksi *boundary layer* yang berkembang pada dinding bagian bawah dan samping. Timbulnya *secondary flow* dapat menyebabkan suatu aliran mengalami penyumbatan aliran (*blockage effect*)



Gambar 4.17 Aliran sekunder pada model 1.(numerik).

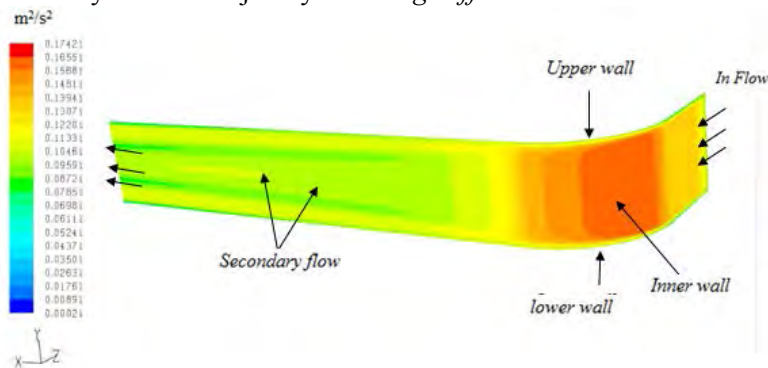


Gambar 4.18 Aliran sekunder pada model 2.(numerik).

Gambar 4.17 dan 4.18 menunjukkan adanya aliran sekunder pada sisi *corner*, *leading edge* dan *trailing edge* pada *elbow* model 1 dan 2. Selain memberikan peran positif yaitu memecah keberadaan aliran sekunder sebagai akibat dari

perbedaan distribusi energi di sisi *inner* dan *outer*, *guide vane* juga memberikan efek negatif yaitu memperbanyak aliran sekunder di sisi *corner*. Titik separasi pada fenomena tersebut dikenal dengan istilah *saddle point*, seperti terlihat pada gambar 4.18 sebagian energi akan hilang digunakan oleh elemen fluida untuk melakukan gerak *rolling*. Gerakan *rolling* ini ditempuh lebih panjang sehingga aliran akan mengalami gesekan lebih besar. Berdasarkan hal tersebut keterkaitan antara aliran sekunder sebagai penyebab terjadinya *pressure drop*, dimana aliran sekunder dipresentasikan dari kerugian tekanan statis aliran.

Terbentuknya aliran sekunder ini ditimbulkan oleh gerak kombinasi elemen fluida yang berada didalam *boundary layer*. Elemen fluida didalam *boundary layer* selain melakukan gerak translasi juga melakukan gerak rotasi. Gerakan rotasi disebabkan karena adanya efek viskositas dan gradient kecepatan. Tepat di dinding kecepatan elemen fluida adalah nol, semakin menjauhi dinding nilai kecepatannya semakin besar. Kondisi ini memungkinkan seolah-olah aliran berotasi di dalam pengembangan dua *boundary layer* pada arah yang berbeda akan menghasilkan *vortex* yang terpinil. Dengan adanya *vortex* terpinil dari aliran sekunder maka akan mengakibatkan *pressure drop* aliran. *Vortex* terpinil ini dapat mengurangi *effective flow area* dan menyebabkan terjadinya *blockage effect*.



Gambar 4.19 *Pathline* di sisi dinding *inner* (simulasi numerik).

Gambar 4.19 terdapat *pathline* menyimpang dari dinding *inner*. Elemen fluida tidak dapat bergerak langsung menuju kesisi tengah karena dibagian tengah terdapat *mainstream flow* yang tidak dapat ditembus aliran. Adanya ketidaksimetrisan distribusi tekanan di sisi *upper* akan menyusuri dinding *upper* dan begitu pula pada sisi *lower*. Setelah sampai pada sisi *inner*, elemen fluida yang semula telah berada di sisi *inner* akan bergeser menuju *center line* karena posisinya segera ditempati oleh elemen fluida yang berasal dari sisi *outer*. Elemen fluida yang berada di *center line* akan bergeser menuju sisi *outer* untuk mengisi kekosongan tempat disisi *outer* karena sebagian telah menuju *inner*. Setelah berada di sisi *inner*, elemen fluida segera bergabung bersama aliran fluida utama.

4.4 Diskusi

Tabel 4.1 Data eksperimen perbandingan *elbow* 90⁰ model 1 dan model 2.

| Peneliti | Bilangan <i>Reynolds</i> | Variasi sudut pengarah | ΔC_p (<i>inlet-outlet</i>) | ΔC_p (<i>inner-outer</i>) |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Adityas, 2014 | 2.1x10 ⁴ | 1 | 0.1412 | 0.1883 |
| | | <i>Rounded</i> (Model 1) | 0.1412 | 0.1883 |
| Danies, 2014 | | Model 2 | 0.4333 | 0.7501 |

Tabel 4.2 Data numerik perbandingan *elbow* 90⁰ Model 1 dan 2.

| Peneliti | Bilangan <i>Reynolds</i> | Variasi sudut pengarah | ΔC_p (<i>inlet-outlet</i>) | ΔC_p (<i>inner-outer</i>) |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Adityas, 2014 | 2.1x10 ⁴ | 1 | 0.1771 | 0.1983 |
| | | <i>Rounded</i> (Model 1) | 0.1770 | 0.1972 |
| Danies, 2014 | | Model 2 | 0.0871 | 0.0351 |

Tabel 4.1 dan 4.2 menunjukkan tabel perbandingan *elbow* 90° model 1 dan 2 secara eksperimen dan numerik. Tabel 4.1 menunjukkan *elbow* model 1 memiliki nilai ΔC_p (*inlet-outlet*) sebesar 0.1412 sedangkan model 2 memiliki nilai ΔC_p (*inlet-outlet*) sebesar 0.4333. Tabel 4.1 nilai ΔC_p (*inner-outer*) model 1 sebesar 0.1883 sedangkan nilai ΔC_p (*inner-outer*) model 2 sebesar 0.7501. Tabel 4.2 menunjukkan *elbow* model 1 memiliki nilai ΔC_p (*inlet-outlet*) sebesar 0.1770 sedangkan model 2 memiliki nilai ΔC_p (*inlet-outlet*) sebesar 0.0871. Tabel 4.4 menunjukkan *elbow* model 1 memiliki nilai ΔC_p (*inner-outer*) sebesar 0.1972 sedangkan model 2 memiliki nilai ΔC_p (*inner-outer*) sebesar 0.0351.

Tabel 4.1 menunjukkan hasil eksperimen, bahwa model 2 memiliki ΔC_p di *inner* dan *outer* yang besar daripada model 1. Semakin besar selisih tekanan antara dinding *inner* dengan dinding *outer elbow* maka akan semakin memacu terjadinya *secondary flow*. Hal ini dikarenakan dengan semakin besar selisih tekanan antara dinding *inner* dengan dinding *outer* maka aliran akan semakin mudah untuk bergerak dari tekanan yang tinggi menuju tekanan yang rendah. Nilai *pressure drop* model 1 adalah $\Delta p = 0.2089$ Pa, sedangkan nilai *pressure drop* model 2 adalah $\Delta p = 8.4878$ Pa. Sehingga *pressure drop* model 1 lebih kecil dari model 2. Sehingga secara eksperimen model 2 tidak memberikan pengaruh terhadap berkurangnya *pressure drop*.

Tabel 4.2 menunjukkan hasil numerik model 2 memiliki selisih C_p di *inner* dan *outer* yang kecil daripada model 1. Semakin besar selisih tekanan antara dinding *inner* dengan dinding *outer elbow* maka akan semakin memacu terjadinya *secondary flow*. Hal ini dikarenakan dengan semakin besar selisih tekanan antara dinding *inner* dengan dinding *outer* maka aliran akan semakin mudah untuk bergerak dari tekanan yang tinggi menuju tekanan yang rendah.

Terjadi perbedaan dari hasil eksperimen dan numerik dikarenakan, alat ukur yang digunakan saat mengambil data

percobaan kurang akurat yang mengakibatkan perbedaan grafik dan kemampuan dari penggambaran model di *software* gambit.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Studi eksperimen dan numerik tentang pengaruh sudut pengarah terhadap *pressure drop* aliran di dalam *horizontal rectangular elbow 90°* telah menghasilkan data-data kuantitatif dan kualitatif. Data-data kuantitatif didapatkan melalui eksperimen dan numerik sedangkan data-data kualitatif mayoritas didapatkan melalui visualisasi numerik. *Test section* yang digunakan pada penelitian ini adalah *horizontal rectangular elbow 90°* yang dilengkapi dengan sudut pengarah.

Data kuantitatif yang didapatkan berupa distribusi C_p pada *midspan* dinding *inner* dan *outer* searah *streamline*, distribusi C_p searah *radial* pada *upper elbow* untuk posisi 0° , 45° , dan 90° serta profil kecepatan pada 9 *section* yang telah ditentukan. Visualisasi numerik yang menggunakan *software Gambit 2.4.6* dan *Fluent 6.3.26* menghasilkan kontur-kontur tekanan statik dan kecepatan pada daerah-daerah yang sama dengan eksperimen. Selain itu visualisasi numerik juga menghasilkan gambaran aliran sekunder. Berdasarkan analisa kuantitatif dan kualitatif dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Hasil eksperimen menunjukkan bahwa *elbow model 2* meningkatkan *pressure drop* sebesar 67.41% jika dibandingkan dengan *elbow model 1*. Hasil numerik menunjukkan bahwa *model 2* menurunkan *pressure drop* sebesar 50.71%. Hal ini dapat diketahui dari perbandingan nilai ΔC_p (*inlet-outlet*) yang dapat dilihat pada tabel 4.1 dan 4.2.
- 2) *Elbow model 1* distribusi koefisien tekanan (C_p) searah *radial* di posisi $\theta = 0^\circ$, 45° dan 90° mempunyai *trend* naik seiring dengan jari-jari kelengkungan sedangkan untuk *model 2* mempunyai *trend* naik seiring dengan jari-jari kelengkungan. Hal ini sesuai dengan hasil eksperimen dan numerik yang didapatkan.

- 3) Hasil eksperimen *elbow* model 2 dapat dilihat pada gambar 4.9, yang menunjukkan bahwa profil kecepatan maksimum berada pada sisi *outer* yang kemudian bergeser menuju *inner* sampai di posisi section 9, sedangkan untuk model 1 profil kecepatan maksimum ada di sisi *inner* yang kemudian bergeser menuju *outer* masih membutuhkan dimensi yang lebih panjang di *downstream* agar profil kecepatan *uniform*.
- 4) Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa aliran sekunder didalam *rectangular elbow 90°* diidentifikasi pada sisi *cross section elbow* yang diakibatkan perbedaan energi pada sisi *inner* dan *outer elbow*. *Elbow* model 1 memiliki jumlah *vortex* 2 buah. *Elbow* model 2 memiliki jumlah *vortex* 4 buah. Semakin banyak *vortex* yang terjadi menyebabkan timbulnya *blockage effect* yang mengakibatkan *pressure drop* meningkat.
- 5) Perbedaan antara hasil eksperimen dengan hasil pemodelan numerik ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah jumlah pengambilan data pada eksperimen lebih sedikit dibandingkan dengan pemodelan numerik. Selain itu pada eksperimen kekasaran permukaan dinding tidak diperhitungkan sedangkan permodelan numerik diperhitungkan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan baik dari hasil eksperimen dan numerik, terdapat beberapa hal yang masih perlu diperbaiki untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih baik pada penelitian selanjutnya. Beberapa saran yang dapat digunakan sebagai pertimbangan antara lain:

- 1) Dalam pengambilan data tekanan sebaiknya digunakan sensor agar lebih akurat seperti *hot wire*, sedangkan alat ukur tekanannya digunakan *pressure transducer*.
- 2) Dalam simulasi numerik sebaiknya digunakan *intensitas turbulensi* dan faktor koreksi yang lain. Hal inidilakukan

supaya hasil numerik dapat mendekati hasil eksperimen dengan baik.

- 3) Membuat inovasi dari sudut pengarah yang akan diletakkan di *elbow* yang memungkinkan dapat mengurangi *pressure drop* dan *secondary flow*.
- 4) Meningkatkan kemampuan dalam pembuatan permodelan di *software* gambit dan *fluent*. Agar dapat memberikan informasi yang tidak ada di eksperimen.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, D.Y., "*Laminar Flow Elbow System and Method*", U.S. Patent Documents, No. 5,323,661, 1994.
- Danbon, F. & Sollicec, C., "*Aerodynamic Torque of Butterfly Valve-Influence of an Elbow on The Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque*", *J. Of Fluids Engineering*, 122, pp. 337-344, 2000.
- Fox, R.W. & McDonald, A. T., "*Introduction to Fluid Mechanics, 5th edition*", John Wiley and Son, Inc, 1998.
- Giuni and Green, Michea., "*Vortex formation on square and rounded tip*", Aerospace and science technology department, UK , 2013.
- Iswati., "*Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Satu Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran di dalam Rectangular Elbow 90°*" Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2009.
- Liou, T.M. Lee, H.L. & Liao, C.C., "*Effect of Inlet Guide-Vane Number in a Side-Dump Combuster Inlet*", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 24 (2001) 11-3, 2000.
- Marn, J. & Primoz, T., "*Laminar Flow of Shear-Thickening Fluid in 90° Pipe Bend*", *Fluid Dynamics Research*, 38, pp. 295-312, 2006.
- Miller, D.S., "*Internal Flow Systems, 2th edition*", BHRA (Information Service), 1990.
- Nicholas, Mulvanny., "*Steady State Evaluation of 'Two-Equation' RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) Turbulence Models for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow Simulations*", Department of Defence Science and Technology Organization, Australia, 2004.
- Puti., "*Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Dua Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran di dalam Rectangular Elbow 90°*" Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2010.

- Schwarzer, J. & Zmrahl, V., "*Numerical Simulation Local Loss Coefficient Ventilation of Duct Fittings*". Department of Environmental Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University, Czech Republic, 2009.
- Tuakia, Firman., "*Dasar-Dasar CFD Menggunakan FLUENT*", Informatika Bandung, 2008.
- Wibowo, Adityas., "*Studi Eksperimental dan Numerik Rectangular elbow 90° yang dilengkapi dengan rounded leading and trailing edge guide vane*" Tugas akhir, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2014.

BIODATA PENULIS



Danies Setyo Husodo lahir pada tanggal 1 Juni 1991 di Kendal, Jawa Tengah. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar di SDN 2 Patukangan, SMPN 2 Kendal dan SMAN 1 Kendal. Kemudian tahun 2009 melalui jalur PMDK jalur Mandiri diterima di jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Ketika menempuh pendidikan sekolah menengah atas masuk kedalam kelas internasional RSBI dari kelas X-XII. Semasa kuliah pernah menjabat sebagai Ka.biro kewirausahaan HMM FTI ITS dan aktif di berbagai kegiatan kemahasiswaan, diantaranya adalah IC Gerigi ITS 2012, IEMC 2012, MECARE 2011, dan IMIC 2010.

Baik kepada sesama dan suka memberi adalah hal yang harus kita lakukan untuk hidup dikehidupan sehari-hari. Walaupun orang yang kita bantu tidak baik kepada kita, akan tetapi saling membantu dan menolong tetap kita lakukan. Dengan kebaikan akan membantu disaat kita kesusahan. Saling membantu adalah moto hidup saya walaupun kita sering disakiti orang lain.